

# Модуль Юнга кубических ауксетиков

Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С.<sup>†</sup>

<sup>†</sup>lisovenk@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, просп. Вернадского 101-1, 119526 Москва

## Young's modulus of cubic auxetics

R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, prospect Vernadskogo 101-1, 119526 Moscow

Для кубических кристаллов с отрицательным коэффициентом Пуассона (кубических ауксетиков) проанализирована изменчивость модуля Юнга. Найдены выражения для экстремальных значений модуля Юнга и их величины.

**Ключевые слова:** модуль Юнга, кубические ауксетики.

We analyzed uniaxial deformation of cubic crystals with negative Poisson's ratio (cubic auxetics). Expressions are given for the maximum and minimum values of Young's modulus.

**Keywords:** Young's modulus, cubic auxetics.

### 1. Введение

Упругие свойства анизотропных материалов (например, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) зависят от ориентации испытываемых образцов. Причем положительность энергии деформации требует положительности модуля Юнга [1] и в общем случае не приводит к ограничению на коэффициенты Пуассона анизотропных упругих кристаллов (для триклинной, моноклинной, орторомбической, тетрагональной, ромбоэдрической, гексагональной и кубической систем), как было показано в [2]. Коэффициент Пуассона для большинства изотропных материалов положителен. Для анизотропных материалов такой коэффициент может быть отрицательным (см., например, [3-6]). Материалы, обладающие отрицательным коэффициентом Пуассона, в литературе называются *ауксетиками*, причем наибольшее количество ауксетиков обнаруживается среди кубических кристаллов [3,5]. В [5] приводится список кубических ауксетиков на основе экспериментальных данных упругих констант, собранных в справочном издании Landolt-Börnstein [7].

В этой работе для кубических ауксетиков дается анализ зависимости модуля Юнга от углов ориентации растягиваемых кристаллических образцов также на основе данных работы [7].

При продольном растяжении тонкого стержня в направлении единичного вектора  $\mathbf{n}$  под действием силы

(на единицу площади сечения) модуль Юнга определяется следующей формулой [8]

$$\frac{1}{E(\mathbf{n})} = s_{ij\alpha\beta} n_i n_j n_\alpha n_\beta, \quad \mathbf{n}^2 = 1, \quad (8)$$

Ниже вместо компонент тензора четвертого ранга в кристаллографической системе координат будут использоваться матричные коэффициенты податливости Фойгта  $s_m = s_{nm}$  [9]. Пользуясь тремя углами Эйлера  $\varphi, \theta, \psi$ , имеем для единичного вектора  $\mathbf{n}$ , связанного со стержнем, представление

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \varphi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}.$$

### 2. Подклассы кубических ауксетиков

Упругость кубических кристаллов можно характеризовать тремя коэффициентами податливости  $s_{11}, s_{12}, s_{44}$ , и при описании ориентации растягиваемого кристаллического стержня в кристаллографической системе координат тремя углами Эйлера  $\varphi, \theta, \psi$  для модуля Юнга  $E$  имеем

$$\frac{1}{E} = s_{11} - \frac{\Delta}{2} M(\varphi, \theta), \quad (1)$$

$$M(\varphi, \theta) = \sin^2 2\theta + \sin^4 \theta \sin^2 2\varphi,$$

где  $\Delta = s_{11} - s_{12} - s_{44}/2$  - коэффициент анизотропии,  $M(\varphi, \theta)$  - функция только угловых переменных, независимая от упругих характеристик кристаллов. Для этой функции справедливо важное ограничение

$$0 \leq M(\varphi, \theta) \leq 4/3.$$

Она является периодической функцией с периодами

$$T_\varphi = \pi/2, T_\theta = 2\pi.$$

Анализ формулы модуля Юнга (1) позволяет определить следующие экстремальные значения:

$$E_1 = \frac{1}{s_{11}}, E_2 = \frac{1}{s_{11} - \Delta/2}, E_3 = \frac{1}{s_{11} - 2\Delta/3}. \quad (2)$$

Экстремальное значение  $E_1$  соответствует одноосному растяжению в направлении [100], значение  $E_2$  - в направлении [110] и значение  $E_3$  - в направлении [111].

Какая экстремальная величина модуля Юнга является максимальной (или минимальной) зависит от знака и величины коэффициента анизотропии  $\Delta$ . Экспериментальные данные [6] указывают на существование двух достаточно обширных подклассов кубических кристаллов с  $\Delta > 0$  и  $\Delta < 0$ .

Для подкласса кубических кристаллов с  $\Delta > 0$  из соотношений (2) следуют неравенства

$$E_3 > E_2 > E_1.$$

Для подкласса кубических кристаллов с  $\Delta < 0$  из этих соотношений следуют противоположные неравенства

$$E_1 > E_2 > E_3.$$

В табл.1 представлены экстремальные значения модулей Юнга согласно формулам (2). Звездочкой помечены материалы, для которых существует несколько экспериментальных наборов упругих констант. Все кубические ауксетики являются умеренными [5] (коэффициент Пуассона может быть отрицательным и положительным в зависимости от ориентации растягиваемого образца), кроме Ba,  $Sm_{0.7}Y_{0.3}S$ ,  $Sm_{0.75}Y_{0.25}S$ ,  $Sm_{0.75}La_{0.25}S$ ,  $Sm_{0.65}La_{0.35}S$  и  $Sm_{0.75}Tm_{0.25}S$ , относящихся к абсолютным ауксетикам. Отметим слабые изменения модуля Юнга (от 49.1 до 50.9 ГПа) и коэффициента Пуассона (от - 0.32 до - 0.34) для  $Sm_{0.65}La_{0.35}S$ . Как видно из таблицы кубические ауксетики имеют высокую степень анизотропии, что отражается на разнице между максимальным и минимальным значением модулей Юнга. Для большинства из материалов коэффициент анизотропии  $|\Delta|$  более десяти ТПа<sup>-1</sup>. Модуль Юнга может существенно меняться (в пять и более раз) для сильно анизотропных кубических ауксетиков. Например, это имеет место для таких материалов, как цезий Cs, калий K, рубидий Rb, InTl, PbTl, CuZn.

Таблица 1

Значения экстремумов модуля Юнга кубических ауксетиков [5]

Материал	$\Delta$ , ТПа <sup>-1</sup>	$E_1$ , ГПа	$E_2$ , ГПа	$E_3$ , ГПа	Материал	$\Delta$ , ТПа <sup>-1</sup>	$E_1$ , ГПа	$E_2$ , ГПа	$E_3$ , ГПа
*Ba	68.2	8.08	11.2	12.8	CuNi (2.34at%Ni)	14.5	67.6	132	194
* $Sm_{0.7}Y_{0.3}S$	-11.3	76.3	53.4	48.5	CuNi (3.02at%Ni)	14.1	67.6	132	195
* $Sm_{0.75}Y_{0.25}S$	-10.8	64.9	48.1	44.3	CuNi (4.49at%Ni)	14.3	68.5	134	196
* $Sm_{0.75}Y_{0.25}S$	-10.8	55.6	42.8	39.7	CuNi (6.02at%Ni)	14.1	69.3	135	198
*UTe	-34.8	143	41.1	33.2	CuNi (6.04at%Ni)	14.1	69	134	196
GeTe-SnTe	-30.7	103	39.9	33.1	CuNi (9at%Ni)	12.3	76.3	143	203
*ReO <sub>3</sub>	-6.1	478	194	162	CuNi (9.73at%Ni)	13.8	70.4	137	200
SmB <sub>6</sub>	-4.04	415	226	196	CuNi (23at%Ni)	12.6	77.5	151	221
*USE	-29.9	235	52.1	41.4	CuNi (31.1at%Ni)	11.9	80.7	155	224
*USb	-23.2	194	59.6	48.4	CuNi (53.8at%Ni)	10.3	92.5	176	251
SnTe	-31.2	98	38.8	32.3	CuNi (65.5at%Ni)	9.48	98.9	186	264
*FeS <sub>2</sub>	-2.2	391	275	251	CuNi (77.2at%Ni)	8.55	108	199	278
Tm <sub>0.99</sub> Se	-14.3	126	66.3	57.3	CuNi (82.2at%Ni)	7.97	114	207	286
TmSe	-15.3	115	61.2	52.9	CuNi (92.7at%Ni)	6.9	126	223	299
Yb	92.9	11.2	23.4	36.7	CuAu (0.23at%Au)	14.6	66.4	129	189
Cs	1295	0.8	1.8	3.1	CuAu (2at%Au)	14.9	65.8	129	190
Pb	103	10.7	23.6	39.6	CuAu (2.8at%Au)	15.3	64.4	127	188
Co	8.4	114	217	312	CuAu (5at%Au)	15.5	63.7	126	186
Li	407	3.2	9	22.9	CuAu (7.5at%Au)	15.1	61.9	123	184
Na	683	1.8	4.8	10.6	CuAu (10at%Au)	16	62.4	125	188
K	1508	0.8	2.2	4.8	CuAu (25at%Au)	15.6	61.5	118	171
Rb	1618	0.8	1.9	4	CuAu (80at%Au)	18	50.8	93.6	130
Ca	111	9.6	20.5	33	Cu <sub>3</sub> Au	11.5	74.6	131	174
Ce	56.2	15.9	28.8	39.5	Cu <sub>45</sub> Ni <sub>5</sub> Zn <sub>50</sub>	42	30	81.1	188

Tl	102	9.9	19.9	30		$\text{Cu}_{40}\text{Ni}_{10}\text{Zn}_{50}$	45.8	28.1	78.6	196
Ag	21.8	43.5	82.6	118		$\text{Cu}_{35}\text{Ni}_{15}\text{Zn}_{50}$	52.1	25.3	73.8	205
Ni	6.5	130	226	299		$\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{20}\text{Zn}_{50}$	57.5	23.2	69.7	210
Cu	14.7	66.7	130	191		$\text{Cu}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Zn}_{50}$	64.7	20.9	64.7	214
Sr	152	6.9	14.7	23.3		$\text{Cu}_{66.5}\text{Zn}_{20.8}\text{Al}_{12.7}$	65	20.7	63.3	201
Th	27.5	36.8	74.2	112.4		LiMg (1.09at%Mg)	425	3.03	8.51	21.4
Fe	6.2	130.4	219.2	283.6		LiMg (2.26at%Mg)	421	3.07	8.64	21.9
Pd	12.7	73	135.6	189.9		LiMg (3.01at%Mg)	419	3.08	8.66	21.9
Au	22.3	42.7	81.6	117.2		LiMg (4.28at%Mg)	418	3.1	8.77	22.6
ZnS	15.9	51.3	86.4	112		AgCd (1.34at%Cd)	22.2	43.3	83.2	120
ZnSe	16.5	47.6	78.3	99.7		AgCd (1.92at%Cd)	22.1	43.3	83.1	120
LiIn	51.7	20.3	42.6	67.3		$\beta_1$ -AgCd (46.7at%Cd)	81	16.1	46.2	123
LiD	8.4	61	82	92.6		$\beta_1$ -AgCd (47.9at%Cd)	100	13.4	40.9	129
LiH	8.6	60.6	82	92.9		AgSn (0.9at%Sn)	22.5	42.7	82.3	119
LiF	7.05	86.2	124	145		AgSn (2at%Sn)	23.3	41.9	81.9	120
$\beta$ -HgS	33.4	27.4	50.4	70.1		AgSn (3.17at%Sn)	23.9	41.2	81	120
HgTe	37	23.1	40.3	53.7		AgSn (4at%Sn)	24	40.7	79.6	117
HgSe	39.4	23	42.1	58.3		AgSn (5.9at%Sn)	25.2	39.4	78.1	116
CuI	42	20.2	35.2	46.7		AgSn (7.8at%Sn)	26.3	38.2	76.9	116
CuBr	60.1	14.9	27.1	37.2		AgZn (2.4at%Zn)	22.9	42.5	82.6	120
CuCl	73.2	13.1	25.3	36.6		AgZn (3.53at%Zn)	23.3	41.9	81.6	119
CdTe	35.3	23.5	40.1	52.4		AgZn (42at%Zn)	77.4	17.1	50.3	143
LaAg	34.6	24.2	41.7	54.8		AgZn (45at%Zn)	75.9	17.3	50.6	140
CeAg	45.6	20.9	39.8	57		AgZn (46.5at%Zn)	45.9	26.3	66.4	135
AgMg	25.9	38.5	76.6	115		AgZn (47at%Zn)	71.8	18.2	52.4	140
CeSn <sub>3</sub>	14.3	51.8	82.3	102		AgZn (48.5at%Zn)	41.2	28.7	70.3	136
SiC	2.58	272	420	512		AgZn (49at%Zn)	64.4	19.9	55.6	138
$\text{Ge}_{0.72}\text{Si}_{0.28}$	7.05	104	165	204		AgZn (50at%Zn)	54.8	22.8	60.5	135
$\text{ThC}_{0.063}$	22.4	41	75.6	105		AgZn (51at%Zn)	61.7	20.8	58	144
FePd (28at%Pd)	161	8.93	31.6	207		AgZn (53at%Zn)	64.9	19.9	56.3	144
FePd (34at%Pd)	52.6	25	72.9	201		AgAl (1.6at%Al)	22.8	42.7	83.3	122
FePd (37at%Pd)	19	56.2	120	194		AgAl (3.9at%Al)	23.3	42	82.3	121
$\text{Mn}_{85.3}\text{Ni}_{8.8}\text{C}_{5.9}$	61.7	21.7	65.6	202		AgAl (5.2at%Al)	24.4	41	81.9	123
$\text{Mn}_{84.7}\text{Ni}_{9.2}\text{C}_{6.1}$	38.7	32.9	90.4	216		AgIn (1.2at%In)	22.5	42.8	82.3	119
$\text{Ni}_{50.6}\text{Al}$	10.2	96.2	188	275		AgIn (2at%In)	23.1	42.3	82.5	121
PuGa (1wt%Ga)	90.2	13.6	34.8	73.2		AgIn (4at%In)	23.8	40.9	79.5	116
CrNi (80.4at%Ni)	6.8	129	231	313		AgIn (6at%In)	23.9	40.8	79.6	117
InTl (25at%Tl)	2111	0.7	2.52	22.4		AgIn (7.9at%In)	24.9	39.4	77.6	114
InTl (27at%Tl)	1475	0.98	3.49	24.4		AgIn (8.36at%In)	25.2	39.5	78.6	117
InTl (28.13at%Tl)	1653	0.9	3.14	23.3		AgPd (6.22at%Pd)	20.9	45.6	87.2	125
InTl (30.16at%Tl)	1267	1.13	3.94	23.6		AgMg (3.07at%Mg)	22.5	42.8	82.5	120
InTl (35.15at%Tl)	784	1.77	5.81	24		AgMg (7.33at%Mg)	23.1	41.8	80.8	117
InTl (39.06%Tl)	602	2.26	7.08	24.4		AgAu (2at%Au)	21.6	44.3	84.9	122
InTl (76.5at%Tl)	240	5.08	12.9	26.8		AgAu (4at%Au)	21.1	45.1	85.9	123
InTl (81.5at%Tl)	190	6.13	14.7	27.5		AgAu (25at%Au)	19.4	48.3	90.7	128
PbTl (1.06at%Tl)	104	10.6	23.6	39.9		AgAu (50at%Au)	18.4	50.8	95.1	134
PbTl (1.77at%Tl)	105	10.5	23.4	39.7		AgAu (75at%Au)	19.3	48.8	92.1	131
PbTl (2.35at%Tl)	103	10.7	23.7	39.8		AuNi (2.95at%Ni)	21.8	43.7	83.2	119
PbTl (3.5at%Tl)	105	10.5	23.2	39.2		AuNi (9.72at%Ni)	20.8	45.7	87	124
PbTl (6.1at%Tl)	107	10.3	23	39		AuNi (22.4at%Ni)	16.8	54.3	100	139

PbTl (5.01at%Tl)	106	10.4	23.2	39.4		AuNi (42.42at%Ni)	14.9	62.5	117	165
PbTl (14.9at%Tl)	117	9.6	21.9	38.2		AuZn (47at%Zn)	75.2	17.4	50.5	138
PbTl (17.6at%Tl)	124	9.17	21.2	37.7		AuZn (50at%Zn)	55.4	22.8	62	145
PbTl (20.5at%In)	127	9	21	37.8		Au <sub>30</sub> Cu <sub>23</sub> Zn <sub>47</sub>	103	13.3	42.1	150
PbTl (31.77at%In)	151	7.75	18.8	35.6		Au <sub>23</sub> Cu <sub>30</sub> Zn <sub>47</sub>	102	13.3	41.8	144
PbTl (40.5at%Tl)	170	7.04	17.5	34.7		Au <sub>20</sub> Cu <sub>33</sub> Zn <sub>47</sub>	75.1	17.7	52.8	155
PbTl (52.66at%Tl)	218	5.71	15.1	33.6		Au <sub>15</sub> Cu <sub>38</sub> Zn <sub>47</sub>	56.6	23	66.2	176
PbTl (61.41at%Tl)	241	5.08	14.2	33.1		Cu <sub>33</sub> Zn <sub>47</sub>	49.2	26.3	74.5	191
PbTl (71.68at%Tl)	207	5.88	15.1	31.5		Au <sub>30</sub> Mn <sub>23</sub> Zn <sub>28</sub>	49.9	25.1	67.3	153
PbIn (5.5at%In)	112	9.96	22.6	39.1		FeSi (4.42at%Si)	7.28	122	219	299
CuMn (1.25at%Mn)	14.9	65.8	129	190		FeSi (5.86at%Si)	7.55	118	214	294
CuMn (2.6at%Mn)	15.1	65	128	189		FeSi (6.29at%Si)	7.91	116	214	299
CuMn (3.5at%Mn)	15.4	64	127	188		FeSi (6.3at%Si)	7.46	120	216	295
CuMn (5at%Mn)	15.8	63	125	187		FeSi (7at%Si)	7.96	115	212	294
CuMn (5.8at%Mn)	15.9	63	125	187		FeSi (8.59at%Si)	8.13	114	212	298
CuMn (40at%Mn)	20.6	52	114	186		FeSi (8.89at%Si)	9.02	107	207	300
CuMn (72at%Mn)	51.7	24.9	70.1	176		FeSi (10.1at%Si)	9.45	104	203	297
CuAl (0.04at%Al)	14.5	67.2	131	192		FeSi (11at%Si)	9.1	106	205	297
CuAl (0.2at%Al)	14.7	66.7	131	192		FeSi (11.68at%Si)	8.79	109	209	302
CuAl (0.75at%Al)	14.7	66.7	131	193		FeSi (12.91at%Si)	8.59	111	212	305
CuAl (1at%Al)	14.8	66.4	130	192		FeSi (24.85at%Si)	9.87	97.9	189	275
CuAl (1.95at%Al)	14.8	66.3	130	193		FeSi (24.86at%Si)	9.87	97.9	189	275
CuAl (2.14at%Al)	14.9	66.3	131	193		FeSi (25.1at%Si)	6.33	137	241	322
CuAl (2.21at%Al)	15	65.7	130	193		NiFeSi (2.7at%FeSi)	7.31	121	216	292
CuAl (3.1at%Al)	15.2	65.2	129	193		FeNi (27.2at%Ni)	11.1	89.3	177	262
CuAl (3.4at%Al)	15.2	65.5	130	193		FeNi (29at%Ni)	12.8	80	164	251
CuAl (4.0at%Al)	15.6	64.4	129	194		FeNi (30.4at%Ni)	13.3	77.5	160	247
CuAl (4.34at%Al)	15.5	64.5	129	193		FeNi (31at%Ni)	19.8	59.5	145	276
CuAl (4.81at%Al)	16	62.9	126	190		FeNi (32.1at%Ni)	15	70.6	150	241
CuAl (4.85at%Al)	15.6	64.3	129	194		FeNi (32.7at%Ni)	16.1	66.9	145	238
CuAl (5at%Al)	15.7	64	128	193		FeNi (33.3at%Ni)	16.3	66.3	144	236
CuAl (6.5at%Al)	16.1	63.1	128	195		FeNi (34.2at%Ni)	17.6	62.5	139	235
CuAl (6.9at%Al)	15.9	63.7	129	195		FeNi (36.5at%Ni)	18.4	60.9	138	239
CuAl (7.05at%Al)	16.2	62.6	127	194		FeNi (38.8at%Ni)	18.4	61.1	139	243
CuAl (7.4at%Al)	16.1	63.1	128	195		FeNi (41.3at%Ni)	17.3	64.4	145	248
CuAl (7.5at%Al)	16.2	62.9	128	195		FeNi (44at%Ni)	15.7	69.5	153	254
CuAl (8.4at%Al)	16.7	61.7	127	195		FeNi (48.8at%Ni)	9.87	97.9	189	275
CuAl (9at%Al)	17.2	60.4	126	197		FeNi (50.2at%Ni)	12.2	84.1	172	265
CuAl (9.85at%Al)	17.3	60.2	125	196		FeNi (58.8at%Ni)	9.23	103	197	282
CuAl (9.86at%Al)	17.4	59.9	125	196		FeNi (73at%Ni)	7.43	119	214	291
CuAl (9.98at%Al)	17.3	59.7	124	193		FeNi (79.2at%Ni)	7.2	122	217	294
CuAl (10.22at%Al)	17.4	59.9	125	196		FeNi (89.5at%Ni)	6.43	131	226	299
CuAl (10.3at%Al)	17.3	60.1	125	196		FeAl (4at%Al)	7.2	122	215	289
CuAl (10.8at%Al)	17.7	59.3	124	196		FeAl (9.6at%Al)	8.75	108	204	290
CuAl (11.77at%Al)	18.1	58.4	124	197		FeAl (14.5at%Al)	10.5	95.7	193	292
CuAl (12.55at%Al)	18.5	57.4	123	198		FeAl (17.8at%Al)	12.5	85.1	181	291
CuAl (13.25at%Al)	18.8	56.8	122	197		FeAl (19.8at%Al)	14.3	77	172	291
CuAl (14at%Al)	19.7	55.2	121	200		FeAl (22.4at%Al)	16.5	69.3	162	292
Cu <sub>2</sub> MnAl	21.1	53.8	124	221		FeAl (23.6at%Al)	18.4	64	156	297
CuZn (1.93at%Zn)	14.9	65.9	129	191		FeAl (25at%Al)	21	57.9	147	304

CuZn (4.1at%Zn)	15.2	64.7	127	188		FeAl (27at%Al)	20.4	59.1	148	299
CuZn (4.59at%Zn)	15.9	62.9	125	188		FeAl (28.1at%Al)	19	62.3	153	297
CuZn (5.02at%Zn)	15.4	64.2	127	189		FeAl (34at%Al)	13.4	81.2	177	293
CuZn (9.1at%Zn)	16.1	61.6	122	182		FeAl (40.1at%Al)	10.9	93.4	190	290
CuZn (14.3at%Zn)	17.1	59.5	121	185		FeCr (19.43at%Cr)	5.16	140	218	269
CuZn (17.4at%Zn)	18	57	117	180		FePt (28at%Pt)	23.2	49	114	203
CuZn (19at%Zn)	19.7	54.1	116	187		AlNi (47.5%Ni)	6.83	119	199	258
CuZn (22.7at%Zn)	19.6	53.6	113	178		AlNi (50%Ni)	11.9	87	180	280
CuZn (29at%Zn)	19.2	54.6	115	181		AlNi (55at%Ni)	20.3	58.8	146	290
CuZn (43at%Zn)	61.1	21.7	64.3	186		AlNi (60%Ni)	58.3	23.6	75.9	288
CuZn (44.3at%Zn)	52.4	25	72.5	198		*AlNi (63.2%Ni)	30.5	42.4	120	307
CuZn (45at%Zn)	52.8	25	73.4	207		NiAl (4.1at%Al)	6.62	129	224	297
CuZn (46at%Zn)	56.8	23.3	68.4	194		NiAl (7.9at%Al)	7.29	121	216	292
CuZn (47.5at%Zn)	38.8	31.9	83.9	182.9		NiAl (12.5at%Al)	8.47	110	205	289
CuZn (47.8at%Zn)	56.8	23.3	68.4	194		Ni <sub>3</sub> Al	8.3	108	196	269
CuZn (48.1at%Zn)	43.6	29.2	80.7	195		Ni <sub>3</sub> Fe (73.8at%Ni)	7.44	119	214	291
CuZn (48.2at%Zn)	47.1	27.5	77.7	199		NiCo (10.11at%Co)	6.22	135	234	308
CuZn (48.3at%Zn)	44.1	29	80.4	197		NiCo (26.35at%Co)	6.56	133	235	316
CuZn (48.8at%Zn)	46.7	27.8	78.9	204		NiCo (32at%Co)	8.19	116	222	318
CuZn (50at%Zn)	27.3	41.7	96.4	171		NiCo (38.45at%Co)	6.8	131	235	321
Cu <sub>50</sub> Zn <sub>50</sub>	34.4	35.1	88.5	180		NiCo (43.5at%Co)	6.9	129	234	321
CuAuZn <sub>2</sub>	158	8.87	29.8	140		NiCo (62at%Co)	7.64	122	228	322
CuSi (4.17at%Si)	16.3	62.1	126	190		Ni <sub>0.73</sub> Zn <sub>0.37</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	33.5	35.2	85.8	165
CuSi (5.16at%Si)	17.1	59.8	123	189		NiCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	191	7.46	26.1	155
CuSi (7.69at%Si)	18.6	56.4	119	189		CoAl (10.49at%Al)	11.7	88.9	186	291
CuSn (0.86at%Sn)	15.3	64.5	127	188		CoAl (12.59at%Al)	12.6	84.2	179	288
CuSn (1.84at%Sn)	16	62.3	124	186		CoAl (13.70at%Al)	13.3	81	175	285
CuSn (3.30at%Sn)	17	59.6	121	183		CoFe (6at%Fe)	9.34	105	208	307
CuSn (15at%Sn)	59.1	22	63	166		CoFe (8at%Fe)	9.72	103	204	305
CuGa (0.36at%Ga)	14.7	66.7	130	191		CoFe (10at%Fe)	18.1	62.8	145	259
CuGa (1.35at%Ga)	14.9	65.9	130	191		CoFe (12at%Fe)	10.5	97	197	300
CuGa (1.58at%Ga)	15.1	65	128	188		CoFe (14at%Fe)	11	93.5	192	298
CuGa (2.15at%Ga)	15.1	65.4	129	191		MnFe (61.5at%Fe)	10.4	97.7	199	304
CuGa (3.27at%Ga)	15.4	64.5	128	190		PdRh (1at%Rh)	12.8	72.8	136	192
CuGa (4.15at%Ga)	15.9	62.9	126	188		PdRh (5at%Rh)	11.7	78.4	145	201
CuGa (5.9at%Ga)	16	62.6	125	188		PdRh (20at%Rh)	7.75	106	180	235
CuGe (1.03at%Ge)	15.3	64.8	128	190		PdAg (2at%Ag)	12.9	72.2	135	191
CuGe (1.71at%Ge)	15.7	63.6	127	189		PdAg (10at%Ag)	14.2	69	135	198
FeCrNi (62.4at%Fe, 19.5at%Cr, 18at%Ni)	9.75	100	195	286		CoAlNi (10.39at%Al, 4.72at%Ni)	11	93.8	194	302
FeCrNi (67.3at%Fe, 19.3at%Cr, 13.3at%Ni)	9.6	101	196	286		CoAlNi (10.58at%Al, 6.57at%Ni)	10.9	95.1	197	306
FeCrNi (70at%Fe, 18at%Cr, 12at%Ni)	9.99	102	206	314		CoAlNi (12.5at%Al, 4.66at%Ni)	11.9	88.9	188	299
FeCrNi (70.5at%Fe, 17.5at%Cr, 12at%Ni)	10.1	100	203	308		CoAlNi (12.68at%Al, 6.57at%Ni)	11.6	90.7	191	302
FeCrNi (71at%Fe, 19at%Cr, 10at%Ni)	11	93.8	194	300		CoAlNi (13.3at%Al, 2.92at%Ni)	12.7	83.9	180	291
FeCrNi (76at%Fe, 12at%Cr, 12at%Ni)	10.1	99.5	200	302		CoAlNi (13.33at%Al, 4.59at%Ni)	12.4	85.7	183	294
FeCrCo (35at%Cr, 15at%Co)	5.7	135	218	275		CoAlNi (14.48at%Al, 6.55at%Ni)	12.1	87.6	187	300

FeCoCrMo (25at%Co, 30at%Cr, 3.4at%Mo)	3.55	156	216	248		CuAlNi (Cu-14wt%Al-4.1wt%Ni)	48	27.5	81.3	233
FeNiCrMo (14.5at%Ni, 14.5at%Cr, 2.5at%Mo)	10.4	97.8	199	305		CuAlNi (Cu-14.5wt%Al-3.15wt%Ni)	54	24.9	75.6	236
AuCuZn (Au-33wt%Cu-47wt%Zn)	69.5	19	55.8	158		CuAlZn (Cu-17at%Al-14.3at%Zn)	66.5	20.2	61.6	194
*Ba	166	6.37	13.5	21.4		*Sm <sub>0.75</sub> Y <sub>0.25</sub> S	-10.75	64.9	48.1	44.3
*AlNi (63.2%Ni)	584	2.54	9.89	266		Sm <sub>0.90</sub> La <sub>0.10</sub> S	-13.9	123	66.2	57.4
*ReO <sub>3</sub>	-5.58	571	220	183		Sm <sub>0.75</sub> La <sub>0.25</sub> S	-9.31	70.2	52.9	48.9
*Use	-26.1	194	54.9	44.3		Sm <sub>0.65</sub> La <sub>0.35</sub> S	-1.07	50.9	49.5	49.1
*USb	-22.7	194	60.6	49.3		Sm <sub>0.85</sub> Tm <sub>0.15</sub> S	-10.1	106	69.1	61.9
*FeS <sub>2</sub>	-1.67	360	277	257		Sm <sub>0.75</sub> Tm <sub>0.25</sub> S	-5.26	65.3	55.7	53.2
*Sm <sub>0.7</sub> Y <sub>0.3</sub> S	-11.25	76.3	53.4	48.5						

### 3. Заключение

В работе проанализирована изменчивость модуля Юнга для кубических кристаллов, обладающих отрицательным коэффициентом Пуассона. Она сильно зависит от коэффициента анизотропии. При этом модуль Юнга для некоторых материалов может меняться в пять и более раз.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №23.*

### Литература

1. L.D. Landau, E.M. Lifshitz. Course of Theoretical Physics, Vol.7, Theory of Elasticity. Pergamon Press. (1970) [Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.7. Теория упругости. М.: Наука (1987)]
2. T.C.T. Ting, T.Q. Chen. J. Mech. and Appl. Math. **58**(1), 73 (2005)
3. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Mechanics of Solids. **45**(4), 529 (2010) [Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Известия РАН, МТТ. 4, 43 (2010)]
4. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Doklady Physics. **54**(12), 546 (2009) [Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. ДАН. **429**(5), 614 (2009)]
5. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Doklady Physics. **56**(7), 399 (2011) [Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. ДАН. **439**(2), 184 (2011)]
6. Belomestnykh V.N., Soboleva E.G. Letters on materials **1**(2), 84 (2011) [Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Письма о материалах. **1**(2), 84 (2011)].
7. Landolt-Börstein-Group III Condensed Matter. Berlin: Springer. V.29a (1992) P.11-188
8. Yu.I. Sirotin, M.P. Shaskol'skaya Foundation of Crystal Physics. Nauka. (1975) (in Russian)
9. J.F. Nye. Physical Properties of Crystals. Oxford Press (1957) [Най Дж. Физические свойства кристаллов. ИЛ (1960).]