

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, О. Н. МАНИК, Т. О. МАНИК,
В. Р. БИЛИНСКИЙ-СЛОТЫЛО

Украина, г. Черновцы, ЧНУ имени Юрия Федыковича
E-mail: manykto@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
04.10 2010 г.

Оппонент д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН
(НУ «Львовская политехника»)

МОЛЕКУЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ И ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТЕЛЛУРА

Рассмотрена молекулярная модель теллура, объясняющая сложную структуру химической связи. Определены его силовые и энергетические характеристики, обусловившие появление ряда технологических решений получения новых материалов.

Современное материаловедение предъявляет всё возрастающие требования к материалам электроники. Среди них определенное значение приобрел теллур, находящий широкое применение в опто-, фото-, сенсорной, квантовой и других областях электроники [1]. Интерес к этому материалу обусловлен его уникальными свойствами — он обладает оптической прозрачностью в ИК-области спектра [2] и существенно анизотропен. По мере повышения чистоты теллура выявляются его новые особенности, расширяются масштабы и специфика использования [3].

Теллур относится к полупроводниковым веществам со структурой, сходной со структурой органических полимеров [3]. Поскольку он кристаллизуется в гексагональной системе и образует спиральные цепочки, каждый его атом имеет два ближайших соседа в собственной цепочке и четыре — более удаленных — в соседних цепочках [2]. Атомы теллура в цепочках характеризуются ковалентной связью. Энергия диссоциации двухатомных молекул Te_2 , равная 2,3 эВ, позволяет судить о величине связи атомов в цепочках. Между собой цепочки связаны силами металлического характера [3].

Такое качественное представление химической связи теллура позволяет объяснить некоторые его физические свойства, однако для создания новых матери-

алов на его основе необходима информация о технологических параметрах с позиций химической связи. Поэтому целью настоящей работы было проведение комплексных исследований динамики формирования химической связи теллура и выяснения особенностей оптимизации материалов на его основе.

На первом этапе стояла задача построения молекулярной модели. Обзор многочисленных работ показал, что теллур обладает гексагональной кристаллической структурой с параметрами решетки $a=4,457 \text{ \AA}$, $c=5,929 \text{ \AA}$ ($c/a=1,33$). Наименьшие расстояния между атомами составляют 3,7919 и 2,8775 \AA , координационное число $K=12$.

На основании этих данных были рассчитаны координаты атомов элементарной ячейки теллура, центр которой совмещен с центром декартовой системы координат. Результаты расчетов приведены в **табл. 1**, а обозначения атомов — на **рис. 1**.

Из анализа приведенных результатов следует, что расстояния между соседними атомами в решетке теллура неодинаковы и подразделяются на 5 семейств:

$$R_{01''}=R_{02''}=R_{03''}=R_{1''2''}=R_{1''3''}=R_{2''3''}=2,89 \text{ \AA};$$

$$R_{01'}=R_{02'}=R_{03'}=R_{1'2'}=R_{1'3'}=R_{2'3'}=3,96 \text{ \AA};$$

$$R_{1'1''}=R_{1'6''}=R_{2'2''}=R_{2'3''}=R_{3'4''}=R_{3'5''}=3,97 \text{ \AA};$$

$$R_{1'1'}=R_{1'2'}=R_{2'3'}=R_{2'4'}=R_{3'5'}=R_{3'6'}=4,32 \text{ \AA};$$

$$R_{01}=R_{02}=R_{03}=R_{04}=R_{05}=R_{06}=4,457 \text{ \AA}.$$

Естественно предположить, что и химические связи, соответствующие этим расстояниям, также будут неэквивалентны. Связь, соответствующую наименьшему расстоянию, обозначим φ_1 и далее в порядке возрастания: $\varphi_1=\varphi(R=2,89 \text{ \AA})$; $\varphi_2=\varphi(R=3,96 \text{ \AA})$; $\varphi_3=\varphi(R=3,97 \text{ \AA})$; $\varphi_4=\varphi(R=4,32 \text{ \AA})$; $\varphi_5=\varphi(R=4,457 \text{ \AA})$.

Существует несколько подходов к выбору моделей химической связи [6], однако законченной тео-

Координаты атомов в элементарной ячейке теллура

Таблица 1

Обозначение атома	x	y	z	Обозначение атома	x	y	z
1	0	4,457	0	1'	1,097	1,9	3,3
2	3,86	2,2285	0	2'	1,097	-1,9	3,3
3	3,86	-2,2285	0	3'	-2,1939	0	3,3
4	0	-4,457	0	1''	-0,8083	1,4	-2,4
5	-3,86	-2,2285	0	2''	1,6166	0	-2,4
6	-3,86	2,2285	0	3''	-0,8083	-1,4	-2,4

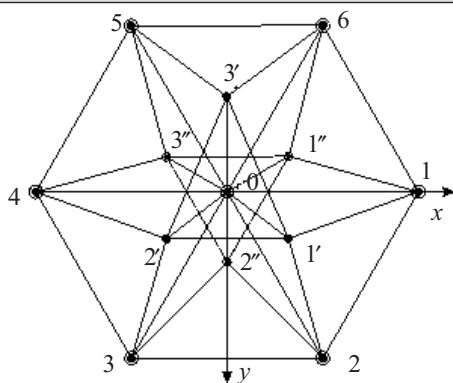


Рис. 1. Проекция элементарной ячейки на плоскость xOy (вид вдоль гексагональной оси симметрии C_6): 0 — центральный атом; 1, 2, 3, 4, 5, 6 — атомы, лежащие в плоскости xOy и находящиеся на расстоянии постоянной решетки $a = 4,457 \text{ \AA}$ от атома 0; 1', 2', 3' — атомы, находящиеся выше плоскости xOy на расстоянии $z = 3,3 \text{ \AA}$, что соответствует расстоянию $R' = 3,9627 \text{ \AA}$, от атома 0; 1'', 2'', 3'' — атомы, находящиеся ниже плоскости xOy на расстоянии $z = -2,4 \text{ \AA}$, что соответствует расстоянию $R'' = 2,8938 \text{ \AA}$, от атома 0

рии до настоящего времени не создано. Для объяснения прочности связей обычно используется представление о резонансе валентных связей [1]. Координационное число атомов в плотноупакованных структурах равно 12, что намного превышает число валентных электронов и не позволяет использовать представление о простой двуцентровой связи. За счет своих валентностей эти атомы образуют ковалентные связи с атомами в ближайшей координационной сфере, и если между ними происходит исключительно быстрое обменное взаимодействие, то это приводит к резонансу валентных связей и сопровождается возбуждением более глубоких электронных оболочек.

Гриффитс Дж. С. [1] объясняет эту картину следующим образом: когда в изолированных атомах не заполнены $(n-1)d$ - и ns -орбитали (n — главное квантовое число внешней оболочки) связь образуется за счет этих орбиталей. В случае когда $(n-1)d$ - и ns -орбитали в сумме дадут шесть неспаренных электронов, число ковалентных связей достигнет максимума. По мере возрастания n разность энергий между уровнями $(n-1)d$ и ns уменьшается, а между ns и np увеличивается. В связи с этим при «движении» по периодической таблице сверху вниз конфигурации ds^q дают прочную связь, а конфигурации sp^q — слабую, т. е. тенденции в изменении прочности связи прямо противоположны.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, приходим к выводу, что плотные гексагональные структуры образуются в результате перекрытия внешних сферических s -оболочек их атомов и стабилизируются d -орбитальными. Такие перекрытия представляют металлические связи, образование которых сопровождается выделением энергии металлической связи $E_{мет}$. Устойчивой структуре отвечает максимальное выделение энергии при образовании металлической структуры. Этому условию отвечает максимально возможное число связей-перекрытий, образованное каждым атомом. При этом смешанные d -, s -состояния валентной зоны теллура характеризуются перекрытием d^{4+6} оболочек, а точнее — их внешних d^6 частей, стабилизирующих кристаллическую структуру [1]. Вследствие этого металлическая составляющая химической связи в плотноупакованных структурах имеет гексагональную симметрию молекулярных π -орбит, построенных на атомных базисных функциях [6].

В свою очередь базисные функции имеют вид гибридных sp -орбиталей. Для нахождения их аналитических выражений необходимо иметь значения пространственных углов θ_{ij} между направлениями химических связей, описываемых гибридными орбитальными ϕ_i и ϕ_j . Результаты расчетов θ_{ij} приведены в табл. 2.

Углы между непересекающимися гибридными орбитальными в расчетах не использовались и в таблице не приведены.

Расчитанные гибридные sp -орбитали Те имеют вид:

$$\phi_1 = 0,5893S + 0,4299P_x - 0,2375P_y + 0,6415P_z; \quad (1)$$

$$\phi_2 = 0,5922S + 0,4352P_x - 0,2378P_y + 0,6351P_z; \quad (2)$$

$$\phi_3 = 0,5053S - 0,3457P_x + 0,4741P_y + 0,6328P_z; \quad (3)$$

$$\phi_4 = 0,5073S - 0,2661P_x + 0,4004P_y + 0,7152P_z; \quad (4)$$

$$\phi_5 = 0,5774S - 0,4083P_x + 0,7024P_y + 0,0812P_z. \quad (5)$$

Анализ этих результатов показывает, что в приближении рассматриваемой модели химической связи в теллуре мы имеем пять неэквивалентных семейств химических связей, что в свою очередь проявляется как на физических свойствах теллура, так и в технологических режимах получения материалов на его основе.

При изучении твердофазных превращений особый интерес вызывают структурные изменения сплавов во время их нагрева выше критической и охлаждения до субкритической температуры. Это дает возможность приблизиться к пониманию проблемы те-

Таблица 2

Значения пространственных углов θ_{ij} между направлениями связей ϕ_i и ϕ_j в теллуре

ϕ_i	ϕ_j				
	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5
ϕ_1	—	$\theta_{12} = 122^\circ 23'$	$\theta_{13} = 79^\circ 18'$	—	$\theta_{15} = 61^\circ 4'$
ϕ_2	$\theta_{21} = 122^\circ 23'$	—	—	$\theta_{24} = 64^\circ 58'$	$\theta_{25} = 61^\circ 21'$
ϕ_3	$\theta_{31} = 79^\circ 18'$	—	—	$\theta_{34} = 93^\circ 18'$	$\theta_{35} = 39^\circ 38'$
ϕ_4	—	$\theta_{42} = 64^\circ 58'$	$\theta_{43} = 93^\circ 18'$	—	$\theta_{45} = 53^\circ 40'$
ϕ_5	$\theta_{51} = 61^\circ 4'$	$\theta_{52} = 61^\circ 21'$	$\theta_{53} = 39^\circ 38'$	$\theta_{54} = 53^\circ 40'$	—

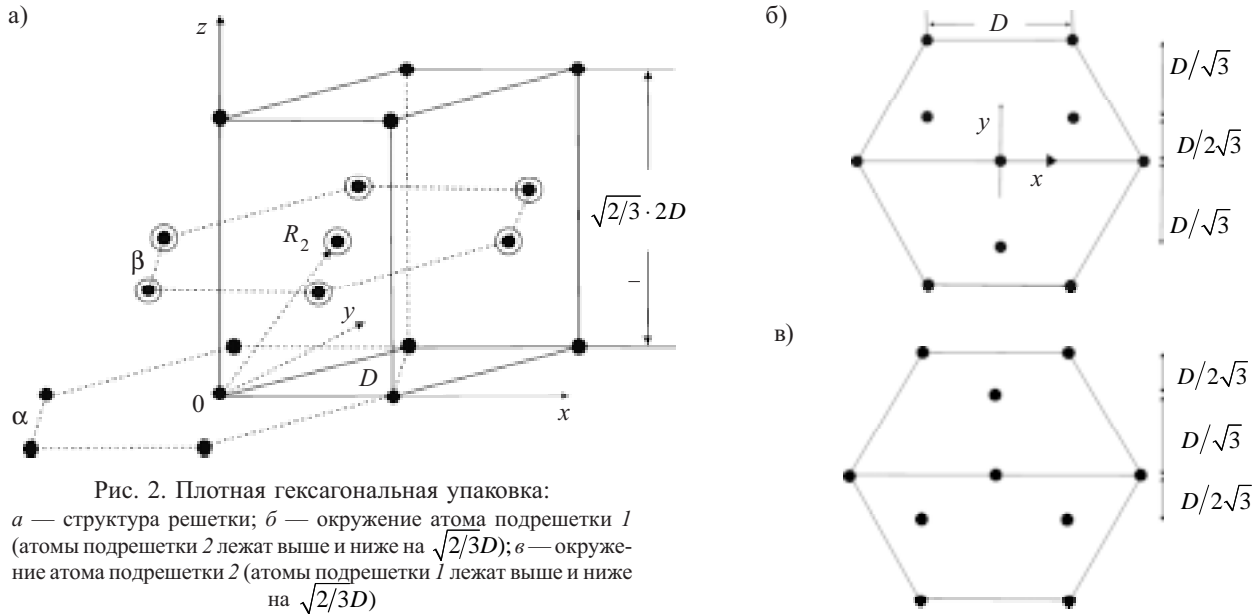


Рис. 2. Плотная гексагональная упаковка:

a — структура решетки; *б* — окружение атома подрешетки 1 (атомы подрешетки 2 лежат выше и ниже на $\sqrt{2/3}D$); *в* — окружение атома подрешетки 2 (атомы подрешетки 1 лежат выше и ниже на $\sqrt{2/3}D$)

оретического описания этих процессов с позиций химической связи.

Различные теоретические представления, используемые при анализе этих процессов [7], являются полуфеноменологическими и базируются на методах аналогий и анализе эволюции исследуемых структур при изменении параметров системы. Эти подходы основываются на подгонке определенной интерпретационной модели к результатам экспериментальных исследований, в связи с чем в настоящее время отсутствует строгая микроскопическая теория неупорядоченных систем. Формирование основ такой теории потребовало расширения базы имеющихся теоретических разработок за счет результатов количественных расчетов, проведенных методами теории химической связи. Такой синтез позволит усовершенствовать классические схемы поиска технологических режимов получения материалов с прогнозируемыми свойствами теоретическими методами, в которых процесс плавления рассматривается как следствие механической нестабильности, приводящей к невозможности существования кристалла при температурах выше температуры его плавления.

При таком подходе на первом этапе необходимо найти взаимосвязь между теорией упругости [8] и теорией решетки [5] путем сопоставления уравнений движения.

Уравнение движения в рамках теории упругости получали при условии равенства сил инерции и сил, заданных напряжениями, в рамках теории решетки — учитывались силы, действующие на атом кристаллической решетки. В предположении пружинной связи с упругой постоянной f между соседними атомами силовые матрицы имеют вид [5]

$$\Phi_{ik}^{h\mu\nu} = -\frac{f}{D^2} (Ah + R_\mu - R_\nu)_i (Ah + R_\mu - R_\nu)_k \quad (6)$$

при условии $|Ah + R_\mu - R_\nu| = D$,

где $\Phi_{ik}^{h\mu\nu}$ — коэффициенты разложения потенциальной энергии в ряд при малых смещениях (их еще называют силовыми матрицами [4]);

A — матрица базисных векторов элементарной ячейки;

R_μ, R_ν — отражают положение структурных элементов в элементарной ячейке;

μ, ν — индексы, обозначающие периодически чередующиеся плоскости α и β (рис. 2) и принимают значения 1 и 2, при этом

$$R_{(1)} = 0; R_{(2)} = \frac{D}{2} \left(1, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \quad (7)$$

Используемый здесь элемент h «переводит» исходный атом в положение рассматриваемого структурного элемента, которое обозначается R_μ или R_ν ($1 \leq \mu, \nu \leq s$), где s — число атомов в элементарной ячейке [5].

В формуле (6) скобка $(A_h + R_\mu - R_\nu)$ означает проекцию отрезка между атомами R_μ и R_ν на i -ось элементарной ячейки ($1 \leq i \leq 3$). Согласно [5], взаимосвязь силовых матриц (6) и упругих постоянных $C_{ik,mn}$ ($1 \leq i, k, m, n \leq 3$) можно записать как

$$C_{ik,mn} = \frac{f}{2V_z D^2} \sum_{h,\mu,\nu} [x_i x_k x_m x_n]_{R=Ah+R_\mu-R_\nu} \quad (8)$$

где x_i — проекции межатомных расстояний на координатные оси.

Суммирование в (8) распространяется на все h, m, n при $|R|=D$. При $\nu=1$ ($|R|=0$) суммирование в (8) производится по всем «соседям» атома.

Аналогичная формула получается и для плотной кубической упаковки. Однако, хотя эти формулы и выглядят одинаково, не следует их отождествлять, т. к. они дают величины $C_{ik,mn}$ различной симметрии окружения. Это связано с тем, что объем элементарной ячейки $V_z^{\text{гекс}}$ гексагональной структуры в два раза больше, чем кубической $V_z^{\text{куб}}$. Это различие обусловлено и тем, что $C_{ik,mn}$ не содержащие внутренних смещений, удовлетворяют соотношениям Коши [5].

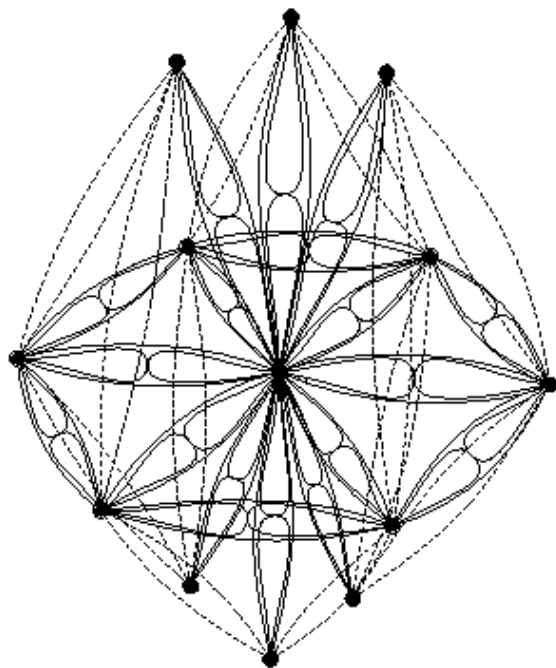


Рис. 3. Молекулярная модель теллура

Упругие постоянные идеальной гексагональной модели относятся между собой как

$$C_{33}:C_{11}:C_{12}:C_{13}:C_{44}=4:3,625:1,375:1:1. \quad (9)$$

В реальности отношение этих постоянных составляет

$$C_{33}:C_{11}:C_{12}:C_{13}:C_{44}=8,8:3,6:1:2,9:4, \quad (10)$$

что подтверждает наличие в теллуре металлической и ковалентной составляющих химической связи.

При описании упругих свойств теллура мы исходили из допущения пружинной связи между ближайшими атомами. Это значит, что колебания вдоль межатомных связей происходят независимо и характеризуются своим коэффициентом упругости $f^{(l)}$, где $1 \leq l \leq 5$.

Соотношение (8) модифицировалось в случае теллура следующим образом:

$$C_{ik, mn} = \frac{1}{2V_z} \sum (l) \Phi_{ik}^{(h)} (Ah_k)_m^l (Ah_k)_n^l, \quad (11)$$

где l — означает принадлежность к определенному типу неэквивалентных орбиталей (рис. 3), а h_k ха-

Таблица 3

Проекция межатомных расстояний R_{ij} на координатные оси

$R_{1'0} = (-1,097; -1,9; 3,3)$	$R_{1''0} = (0,8083; -1,4; -2,4)$
$R_{1'1} = (-1,097; 2,557; 3,3)$	$R_{1''6} = (-3,05157; 0,8285; -2,4)$
$R_{1'2} = (2,7629; 0,3285; 3,3)$	$R_{1''1} = (0,8083; 3,057; -2,4)$
$R_{2'0} = (-1,97; 1,9; 3,3)$	$R_{2''0} = (-1,61658; 0; -2,4)$
$R_{2'3} = (2,7628; -0,3285; 3,3)$	$R_{2''2} = (2,2433; 2,2285; -2,4)$
$R_{2'4} = (-1,097; -2,557; 3,3)$	$R_{2''3} = (2,2433; -2,2285; -2,4)$
$R_{3'0} = (2,1939; 0; 3,3)$	$R_{3''0} = (0,8083; 1,4; -2,4)$
$R_{3'5} = (-1,6659; -2,2285; 3,3)$	$R_{3''4} = (0,8083; -3,057; -2,4)$
$R_{3'6} = (-1,6659; 2,2285; 3,3)$	$R_{3''5} = (-3,0516; -0,8285; -2,4)$
$R_{01} = (0; 4,457; 0)$	$R_{04} = (0; -4,457; 0)$
$R_{02} = (3,86; 2,2285; 0)$	$R_{05} = (-3,86; -2,2285; 0)$
$R_{03} = (3,86; -2,2285; 0)$	$R_{06} = (-3,86; 2,2285; 0)$

актеризует переход атомных связей в рамках одного семейства под действием элементов симметрии.

Колебания вдоль атомных связей определяются соответствующим коэффициентом упругости $f^{(l)}$. При этом величины $(l) \Phi_{ik}^{(h)}$ связаны с $f^{(l)}$ соотношением

$$\| (l) \Phi_{ik}^{(h)} \| = f^{(l)} \| (l) \alpha_{ik}^{(h)} \|, \quad (12)$$

где $(l) \alpha_{ik}^{(h)} = \cos \theta_{li}^h \cos \theta_{lk}^h$; θ_{li}^h и θ_{lk}^h — углы между направлением химической связи Φ_l рассматриваемого атома на позиции h с осями x_i и x_k ($1 \leq i, k \leq 3$).

Для проведения расчета коэффициентов упругости $f^{(l)}$ необходимы численные значения проекций межатомных расстояний R_{ij} на оси координат. Результаты расчетов этих проекций приведены в табл. 3.

На основании этих результатов составлены соотношения типа (11), характеризующие взаимосвязь между силовыми матрицами и упругими постоянными кристаллов теллура. Решая далее полученную систему уравнений относительно $f^{(l)}$, определяем аналитические выражения и численные значения силовых констант микроскопической теории $f^{(l)}$. Аналитические выражения силовых констант при этом имеют вид

$$f^{(1)} = 30242,98C_{11} - 45369,80C_{12} + 448,93C_{13} - 271,1C_{14} - 18,42C_{33} - 271,1C_{44} - 45369,80C_{66}; \quad (13)$$

$$f^{(2)} = -27391,36C_{11} + 41091,87C_{12} - 389,93C_{13} + 236,24C_{14} + 15,23C_{33} + 236,24C_{44} + 41091,87C_{66}; \quad (14)$$

$$f^{(3)} = -19077,51C_{11} + 28619,63C_{12} + 1851,60C_{13} - 1209,78C_{14} - 61,33C_{33} - 1209,78C_{44} + 28619,63C_{66}; \quad (15)$$

$$f^{(4)} = -4074,81C_{11} + 6242,45C_{12} + 465,82C_{13} - 349,98C_{14} - 10,75C_{33} - 349,97C_{44} + 6242,45C_{66}; \quad (16)$$

$$f^{(5)} = 2228,08C_{11} - 3342,52C_{12} - 168,39C_{13} + 98,62C_{14} + 7,32C_{33} + 98,62C_{44} - 3342,51C_{66}. \quad (17)$$

Необходимые для расчета силовых констант $f^{(l)}$ значения упругих постоянных C_{ij} взяты из экспериментальных данных [2]. Согласно (13)—(17), коэффициенты упругости $f^{(l)}$, соответствующие неэквивалентным орбиталем Φ_l в теллуре, составляли (в Н/м): $f^{(1)} = 65$; $f^{(2)} = -59$; $f^{(3)} = -58$; $f^{(4)} = -2$; $f^{(5)} = 6$.

Анализ полученных результатов показывает, что в отличие от идеальной гексагональной структуры, где силовые постоянные $f^{(l)}$ для всех l одинаковы, для теллура имеем разброс численных значений $f^{(l)}$, что указывает на наличие тонкой структуры плавления и кристаллизации этого вещества.

Далее эти результаты используются в расчетах энергетических параметров кристаллов теллура. В нашем случае это характеристические частоты колебаний атомов вдоль химических связей. Методика проведения таких расчетов для ромбических кристаллов приведена в [9—11] и сводится к нахождению коэффициентов взаимодействия динамической

матрицы $D_{ij} = \sum A_{il} \cdot K_{lj}$. Для этого необходимо найти кинематические коэффициенты A_{il} и динамические коэффициенты K_{lj} при всех возможных значениях индексов i, l, j .

Таблица 4
Численные значения коэффициентов K_{ij} , Н/м

l	j				
	1	2	3	4	5
1	65	-34,841	12,071	31,447	0
2	31,625	-59	0	-28,291	-24,957
3	-10,771	0	-58	-44,666	3,351
4	-5,806	-5,754	-9,241	-12	-7,109
5	0	2,538	-0,347	3,555	6

Таблица 5
Численные значения характеристической частоты и характеристической температуры

Параметр	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
$\omega, 10^{-12}$ ГФ	40,243	30,674	25,175	19,084	4,237
T, K	722,5	684	670	648	623

Расчет коэффициентов проводился с помощью молекулярной модели (рис. 3) согласно [4], а также решения обратной задачи теории упругости [8]. Перед определением численных значений коэффициентов K_{ij} [4] заметим, что K_{ij} соответствует силе, приложенной к атому в направлении l -орбитали, которая приводит к смещению в направлении j -орбитали. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Полученные результаты использовались для расчетов характеристических частот и соответствующих им значений температуры разрушения химических связей. Рассмотренный подход позволяет объяснить тонкую структуру плавления и кристаллизации, проследить динамику формирования химической связи в кристаллах теллура. В табл. 5 приведены численные значения, оценка которых проводилась согласно [9–12].

Таким образом, рассмотренная молекулярная модель теллура, представленная структурой химической

связи неэквивалентными орбиталями φ_l ($1 \leq l \leq 5$) и соответственно пятью характеристическими температурами $T_1 \dots T_5$, позволяет выявить интервал температуры, соответствующий определенной длине связи. Ковалентная составляющая химической связи определяется температурами T_1, T_2, T_3 , а металлическая — температурами T_4 и T_5 . При соответствующих технологических подходах эта особенность позволяет в широких пределах управлять физическими свойствами монокристаллического теллура.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сайто К., Хаякава С., Такеи Ф., Ямадера Х. Химия и периодическая таблица.— М.: Мир, 1982.
2. Горлей П. М., Радченко В. С., Шендеровский В. А. Процессы переноса в теллуре.— Киев: Наукова думка, 1987.
3. Чижигов Д. М., Счастливый В. П. Телур и телуриды.— М.: Наука, 1966.
4. Маник О. М. Багатофакторний підхід в теоретичному матеріалознавстві.— Чернівці: Прут, 1999.
5. Лейбфрид Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов.— М.— Л.: Госиздат, 1963.
6. Хохштрассер Р. Молекулярные аспекты симметрии.— М.: Мир, 1968.
7. Убеллоде А. Р. Расплавленное состояние вещества.— М.: Металлургия, 1982.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М.: Наука, 1965.
9. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Маник О. Н., Маник Т. О. Математические модели формирования химической связи твердых растворов CdSb-ZnSb // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— Т. 6, № 84.— С. 56—59.
10. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Маник О. Н. и др. Химическая связь в низкосимметричных кристаллах CdSb, ZnSb, Cd_xZn_{1-x}Sb и особенности их технологии // Неорганические материалы.— 2010.— Т. 46, № 6.— С. 649—655.
11. Ащеулов А. А., Гуцул И. В., Маник О. Н., Маник Т. О. Особенности оптимизации материалов на основе CdSb // Сенсорная электроника и микросистемные технологии.— 2010.— Т. 1, № 7.— С. 64—70.
12. Ashcheulov A. A., Manik O. N., Marenkin S. F. Cadmium antimonide: Chemical Bonding and technology // Inorganic materials.— 2003.— V. 39, № 2.— P. 59—67.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Айхлер Ю., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение.— М.: Техносфера, 2008.— 440

Лазеры играют важнейшую роль в сфере технических измерений, информационных технологий, обработки материалов, медицине и других областях науки. В книге приведен обзор наиболее распространенных типов лазеров с описанием их многочисленных применений. Рассматриваются основы лазерной оптики, оборудование для анализа лазерного излучения, приводятся характеристики лазерных материалов. Заключительные главы посвящены рассмотрению наиболее важных областей применения лазерных установок и перспектив их дальнейшего развития. Простота и доступность изложения делает книгу прекрасным пособием для студентов вузов, преподавателей, учителей и школьников.

