

PACS: 72.80.Ey, 72.80.Cw, 71.23.-k

М.И. Даунов, И.К. Камилов, С.Ф. Габиров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА  
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА  
В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Институт физики Дагестанского научного центра РАН  
ул. М. Ярагского, 94, г. Махачкала, 367003, Россия  
E-mail: i.daunov@mail.ru

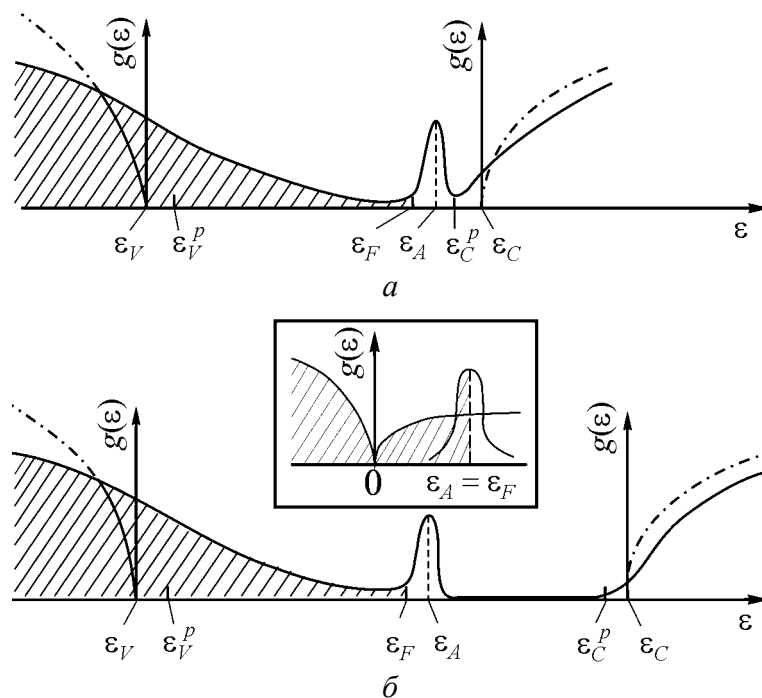
*Предлагается способ оценки корректности применения соотношений, полученных для энергетического спектра бездефектного кристалла, при анализе результатов эксперимента в легированных компенсированных кристаллах полупроводников, основанный на сравнении рассчитанных по данным об электронном транспорте при всестороннем давлении производных энергетических зазоров от давления  $d\varepsilon_i/dP$  с известными величинами. Проанализированы экспериментальные данные и результаты количественного анализа в  $Ge(Au, Sb)$ , квазибесщелевом  $CdSnAs_2(Cu)$  и бесщелевом  $p-HgTe$  полупроводниках. Выяснено, что величины  $d\varepsilon_i/dP$  энергетических зазоров, рассчитанные согласно известным законам дисперсии, с понижением температуры и увеличением давления аномально завышаются или занижаются ввиду усиливающегося влияния флуктуационного потенциала на энергетический спектр носителей заряда.*

Известно [1,2], что в легированных компенсированных полупроводниках, когда концентрация свободных носителей заряда мала по сравнению с концентрацией ионизированных примесных центров, возникают плавные крупномасштабные флуктуации случайного потенциала с типичным значением амплитуды  $\gamma$ . Влияние хаотического потенциала усиливается с понижением температуры, а при фиксированной температуре под воздействием давления – с уменьшением концентрации свободных носителей заряда [3]. Очевидно, актуален поиск способа оценки степени влияния хаотического потенциала на энергетический спектр носителей заряда и корректности применения соотношений, выведенных для бездефектного кристалла, с целью количественного анализа результатов эксперимента в каждом конкретном случае.

В связи с обсуждаемой проблемой отметим следующее. В полупроводниках при не очень высоких давлениях производные энергетических зазоров от давления  $d\varepsilon_i/dP$  практически не зависят от давления. Смещения идентичных, наиболее глубоких минимумов зоны проводимости  $\varepsilon_\Gamma$ ,  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_X$  в разных полу-

проводниках IV, II–VI, III–V, IV–VI и II–IV–V<sub>2</sub> приблизительно одинаковы [4–8]. В [5] определены  $d\varepsilon_i/dP$  экстремумов  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_L$ ,  $\varepsilon_X$  относительно абсолютного вакуума с использованием концепции независимости энергии глубоких сильно локализованных состояний от всестороннего давления в некоторых полупроводниках.

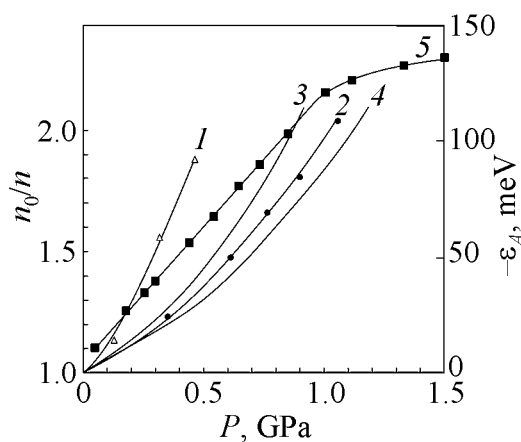
В так называемых квазибесщелевых полупроводниках [6] вблизи края собственной зоны расположена глубокая примесная зона, например в легированных компенсированных  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) [7] (рис. 1) и  $p$ -InAs с концентрацией избыточных акцепторов  $N_{\text{ext}} < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [8]. Применение закона дисперсии для идеального полупроводника к полупроводнику со случайным потенциалом корректно до тех пор, пока вычисленная по результатам комплексного исследования электронного транспорта и соответствующих соотношений зависимость энергетических зазоров от всестороннего давления  $\Delta\varepsilon(P)$  близка к линейной. Возрастающее с понижением температуры и уменьшением концентрации свободных носителей заряда отклонение зависимости  $\Delta\varepsilon(P)$  от линейности свидетельствует о существенном влиянии случайного потенциала на закон дисперсии.



**Рис. 1.** Плотность состояний (схематически) сильнолегированного компенсированного полупроводника с глубокой акцепторной зоной  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) с коэффициентом заселенности акцепторной зоны  $K_A \approx 0$  при атмосферном (а) и всестороннем (б) давлениях. На вставке – плотность состояний слаболегированного и умеренно компенсированного бесщелевого полупроводника  $p$ -HgTe.  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_C$  – невозмущенные энергии вершины валентной зоны и дна зоны проводимости;  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_F$  – энергии глубокого акцепторного уровня и уровня Ферми;  $\varepsilon_V^p$ ,  $\varepsilon_C^p$  – энергии уровней протекания для дырок валентной зоны и электронов зоны проводимости. Штрихпунктирная линия – ход плотности состояний в идеальном кристалле. Заполненные состояния заштрихованы

В качестве примера рассмотрим ситуацию в кристаллах  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu), в которых был обнаружен глубокий акцепторный уровень (зона) собственного дефекта вакансии кадмия, расположенный на хвосте зоны проводимости (рис. 1) [3]. Здесь и далее характеристические параметры носителей заряда и  $d\varepsilon_i/dP$  рассчитывали по данным комплексных исследований кинетических коэффициентов, в частности по температурным, магнитополевым и барическим зависимостям коэффициента Холла и удельной электропроводности. Из рис. 2 видно, что в образце № 10  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) зависимость  $\varepsilon_A(P)$  при  $P > 10$  kbar существенно ослабляется, т.е. величина  $d\varepsilon_i/dP$  начинает зависеть от давления и аномально занижается, что обусловлено влиянием хаотического потенциала на энергетический спектр уже при  $T = 295$  К. В этом образце коэффициент заселенности  $K_A$  глубокой акцепторной зоны близок к нулевой величине, что и объясняет столь сильное влияние хаотического потенциала. В кристаллах  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) с  $K_A > 0$  влияние случайного потенциала выражено слабее и, по крайней мере, при  $T = 77.6$  К вблизи атмосферного давления влиянием случайного потенциала на энергетический спектр можно пренебречь [3,6].

Аналогичное аномальное убывание  $\partial|\varepsilon_A|/\partial P$  с понижением температуры от 295 до 77.6 К, обусловленное усиливающимся влиянием хаотического потенциала на энергетический спектр носителей заряда, наблюдается также в  $p$ -InAs с  $N_{\text{ext}} < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [8].



**Рис. 2.** Зависимости нормализованных к атмосферному давлению концентраций электронов от всестороннего давления образца  $p$ -HgTe с  $N_A - N_D = 3.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 82$  К (кривая 1) и  $T = 297$  К (кривые 2–4). Точки – расчет по  $R(H, P)$ . Сплошные линии – теория для величин барического коэффициента  $\partial\varepsilon_g/\partial P$ , meV/GPa: 1 – 220, 2 – 85, 3 – 110, 4 – 80. Кривая 5 – зависимость энергии уровня глубокого акцептора  $\varepsilon_A$  при 280 К от давления для образца № 10  $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu)

на энергетический спектр носителей заряда, наблюдается также в  $p$ -InAs с  $N_{\text{ext}} < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [8].

Из данных [9] (таблица) для Ge(Au) и [10] для Ge(Cu) следует, что значения  $d\varepsilon_i/dP$  как будто убывают по мере удаления уровня энергии примесного центра от края валентной зоны. Отметим лишь кратко, что имеются две причины, приводящие к занижению  $\beta_{CL} = \partial(E_{CL} - E_i)/\partial P$  в области электронной проводимости и  $\beta_V = \partial(E_i - E_V)/\partial P$  в области дырочной проводимости. Это, во-первых, необходимость применения статистики Гиббса, что не было корректно учтено в [10]. В работе [9] было принято во внимание это обстоятельство, и для получения достоверных результатов в Ge(Au) измерения зависимости удельного сопротивления от давления проводили при низких температурах. Од-

нако в легированном и компенсированном германии такие слаборастворимые примеси, как Au, Hg и Cu, с высокой степенью вероятности создают кластеры.

Таблица

**Значения производных энергетических зазоров  $d\varepsilon_i/dP$  от давления для четырех уровней золота в германии\***

| Уровень         | Тип      | $\varepsilon_C - \varepsilon_i$ , eV | $\partial(\varepsilon_{CL} - \varepsilon_i)/\partial P$ , meV/GPa | $T$ , К |
|-----------------|----------|--------------------------------------|---|---------|
| $\varepsilon_4$ | Акцептор | 0.043                                | 21  | 45–49.3 |
| $\varepsilon_3$ |          | 0.19                                 | 29 (44 <sup>**</sup> )  | 112–194 |
| $\varepsilon_2$ |          | 0.60                                 | 44  | 170–273 |
| $\varepsilon_1$ | Донор    | 0.71                                 | 49  | 49.5    |
| $\varepsilon_V$ |          | 0.75                                 | 50  |         |

\* По зависимостям удельного сопротивления от давления до 0.7 GPa [9].

\*\* По зависимостям удельного сопротивления и коэффициента Холла от давления до 7 GPa при 300 К [11].

При убывании температуры и увеличении давления концентрация свободных носителей заряда уменьшается, амплитуда случайного потенциала и соответственно флуктуационное искривление зон возрастают. Это неизбежно ведет к занижению  $d\varepsilon_i/dP$ , рассчитанных по барической зависимости концентрации носителей заряда, что иллюстрируется данными, приведенными в таблице. Очевидно также, что степень влияния хаотического потенциала тем сильнее, чем ближе к краю собственной зоны находится уровень энергии глубокого примесного центра и чем ниже температура (таблица). Согласно [5] значения  $d\varepsilon_i/dP$  между уровнями золота 2–4 и дном зоны проводимости  $\beta_{CL} = 44$  meV/GPa, а между уровнем золота 4 и потолком валентной зоны  $\beta_V = -6$  meV/GPa. Барический коэффициент ширины запрещенной зоны  $\partial\varepsilon_g/\partial P = \beta_{CL} - \beta_V = 50$  meV/GPa.

При определении значений  $d\varepsilon_i/dP$  необходим также детальный анализ данных оптических и других свойств полупроводников. В [12,13] по данным исследований оптических свойств в халькопиритных полупроводниках I–III–VI<sub>2</sub> и II–IV–V<sub>2</sub> приводятся заниженные значения барического коэффициента ширины запрещенной зоны.

В вышеперечисленных полупроводниках с увеличением всестороннего давления энергетические зазоры возрастают, а усиливающееся влияние хаотического потенциала с понижением температуры и концентрации свободных носителей заряда приводит к аномальному занижению значений  $d\varepsilon_i/dP$ .

В отличие от обычных полупроводников в бесщелевых полупроводниках с инверсной зонной структурой, например в *p*-HgTe (рис. 1),  $\beta = \partial|\varepsilon_g|/\partial P < 0$  ( $\varepsilon_g = \varepsilon_{\Gamma_6} - \varepsilon_{\Gamma_8}$ ) [14]. По экспериментальным данным о температурных, барических и магнитопольных зависимостях коэффициента Холла  $R(T, H, P)$  и

удельной электропроводности  $\sigma(T, H, P)$  был рассчитан коэффициент  $\beta$  для слаболегированного образца  $p$ -HgTe-2 [15] и сильнолегированного образца  $p$ -HgTe (рис. 2) [16]. В слаболегированном образце  $p$ -HgTe-2 при температурах 295 и 77.6 К коэффициент  $\beta = -(121 \pm 2) \text{ meV/GPa}$ , при 4.2 К  $\beta = -220 \text{ meV/GPa}$ ; в сильнолегированном образце  $p$ -HgTe (рис. 2) при  $T = 295 \text{ К}$   $\beta = -85 \text{ meV/GPa}$ , при  $T = 77.6 \text{ К}$   $\beta = -210 \text{ meV/GPa}$ . В образце  $p$ -HgTe с  $N_A - N_D = 3.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  положение уровня Ферми задается статистикой дырок валентной зоны и практически не зависит от давления ( $p \gg n$ ). Оценки сделаны с использованием известных сведений об энергетическом спектре носителей заряда и о величинах зонных параметров, приведенных в [14].

Полученные значения коэффициента  $\beta$  для образца  $p$ -HgTe-2 при 77.6 и 295 К и для образца  $p$ -HgTe при 295 К согласуются с известными данными [14,15]. Однако с понижением температуры рассчитанный коэффициент  $|\beta|$  аномально возрастает, причем в образце  $p$ -HgTe-2 с большей степенью беспорядка при более высоких температурах. Эта тенденция не зависит от того, является ли образец сильно- или слаболегированным, и обусловлена существенным влиянием случайного потенциала на электронный спектр бесщелевых полупроводников при низких температурах.

### Выводы

По результатам количественного анализа данных об электронном транспорте при всестороннем давлении в легированных компенсированных обычных, квазибесщелевых и бесщелевых полупроводниках выяснено: значения  $d\varepsilon_i/dP$ , рассчитанные согласно известным законам дисперсии, с понижением температуры и увеличением давления аномально завышаются или занижаются ввиду усиливающегося влияния флуктуационного потенциала на энергетический спектр носителей заряда. Таким образом, всестороннее давление является уникальным внешним воздействием, позволяющим определить степень влияния хаотического потенциала на энергетический спектр носителей заряда и оценить адекватность интерпретации экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-02-00238).

1. *Б.И. Шкловский, А.А. Эфрос*, Электронные свойства легированных полупроводников, Наука, Москва (1979).
2. *В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Кайпер, Р. Эндерлайн, Б. Эссер*, Электронная теория неупорядоченных полупроводников, Наука, Москва (1981).
3. *М.И. Даунов, А.Б. Магомедов, В.И. Данилов*, ФТП **26**, 467 (1991).
4. *W. Paul*, J. Appl. Phys. **32**, 2082 (1961).
5. *М.И. Даунов, И.К. Камиров, С.Ф. Габитов*, ФТТ **46**, 1766 (2004).

6. М.И. Даунов, И.К. Камилов, В.А. Елизаров, А.Б. Магомедов, В.И. Данилов, Докл. РАН **357**, 612 (1997).
7. М.И. Даунов, И.К. Камилов, А.Б. Магомедов, ЖЭТФ **111**, 562 (1997).
8. М.И. Даунов, И.К. Камилов, А.Б. Магомедов, А.Ш. Киракосян, ФТП **33**, 36 (1999).
9. M.G. Holland, W. Paul, Phys. Rev. **128**, 43 (1962).
10. Е.Г. Пель, В.И. Фистуль, А. Ягшигельдыев, А.Г. Яковенко, ФТП **14**, 1220 (1980).
11. М.И. Даунов, И.К. Камилов, С.Ф. Габибов, ФТП **35**, 59 (2001).
12. In-Hwan Chor, P.Y. Yu, Phys. Status Solidi **B211**, 143 (1999).
13. In-Hwan Chor, P.Y. Yu, Phys. Status Solidi **B235**, 307 (2003).
14. I.M. Tsidilkovski, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, Adv. Phys. **34**, 43 (1985).
15. J. Stankiewicz, W. Giriat, Phys. Rev. **B13**, 665 (1976).
16. M.I. Daunov, E.L. Broyda, Phys. Status Solidi **B55**, K155 (1973).

*М.И. Даунов, И.К. Камілов, С.Ф. Габібов*

#### ВИКОРИСТАННЯ ВСЕБІЧНОГО ТИСКУ ДЛЯ ОЦІНКИ СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ФЛУКТУАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СПЕКТР НОСІЇВ ЗАРЯДУ В КРИСТАЛІЧНИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ

Пропонується спосіб оцінки коректності застосування співвідношень, отриманих для енергетичного спектру бездефектного кристала, при аналізі результатів експерименту в легованих компенсованих кристалах напівпровідників, заснований на порівнянні розрахованих по даним про електронний транспорт при всебічному тиску похідних енергетичних зазорів від тиску  $d\varepsilon_i/dP$  з відомими величинами. Проаналізовано експериментальні дані і результати кількісного аналізу в Ge(Au, Sb), квазібезщільному CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) і безщільному *p*-HgTe напівпровідниках. З'ясовано, що величини  $d\varepsilon_i/dP$  енергетичних зазорів, розраховані згідно з відомими законами дисперсії, з пониженням температури і збільшенням тиску аномально завищуються або занижуються внаслідок зростаючого впливу флуктуаційного потенціалу на енергетичний спектр носіїв заряду.

*M.I. Daunov, I.K. Kamilov, S.F. Gabibov*

#### APPLICATION OF HYDROSTATIC PRESSURE FOR ESTIMATION OF THE EXTENT OF FLUCTUATION POTENTIAL EFFECT ON ENERGY SPECTRUM OF CHARGE CARRIERS IN CRYSTALLINE SEMICONDUCTORS

A method is proposed to estimate the correctness of application of relationships derived for the energy spectrum of defect-free crystal during the analysis of experimental results for doped compensated crystals of semiconductors. The method is based on comparison of derivatives of the energy gaps versus pressure  $d\varepsilon_i/dP$  calculated using data on electron transport under uniform pressure and the known values. Experimental data and results of quantitative analysis in Ge(Au, Sb), quasi-gap free CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) and gap-free *p*-HgTe semiconductors have been analysed. It has been determined that the  $d\varepsilon_i/dP$  values of en-

ergy gaps calculated by the known dispersion laws increase or decrease, with temperature decrease and pressure increase, because of growing influence of fluctuation potential on the energy spectrum of charge carries.

**Fig. 1.** Schematic diagram of the density of states (DOS) in heavily doped compensated semiconductor ( $p$ -CdSnAs<sub>2</sub>(Cu)) with a deep acceptor band with nearly zero occupancy  $K_A \approx 0$  at atmospheric ( $a$ ) and elevated hydrostatic ( $b$ ) pressure (the inset shows the DOS for the slightly doped, moderately compensated gapless semiconductor  $p$ -HgTe.  $\varepsilon_V, \varepsilon_C$  are unperturbed energies of the valence-band top and conduction-band bottom, respectively;  $\varepsilon_A, \varepsilon_F$  are the energies of a deep acceptor level and the Fermi level, respectively;  $\varepsilon_V^p, \varepsilon_C^p$  are the energies of percolation levels for holes in the valence band and electrons in the conduction band, respectively; the dash-dot curve indicates the DOS in the ideal crystal; cross-hatched regions correspond to occupied states

**Fig. 2.** Plots of the electron concentration (normalized to that at atmospheric pressure) versus hydrostatic pressure for  $p$ -HgTe with  $N_A - N_D = 3.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ : as determined from the pressure dependence of  $R(H, P)$  at  $T = 82$  (curve 1) and 297 K (curves 1–4). Solid lines – theory for  $\partial\varepsilon_g/\partial P$  values, meV/GPa: 1 – 220, 2 – 85, 3 – 110, 4 – 80. Curve 5 – pressure dependence of the deep acceptor level  $\varepsilon_A$  at 280 K for CdSnAs<sub>2</sub>(Cu) (sample № 10)

лаз, амфибол, клинопироксен, скаполит) полосчатых кристаллических сланцев, которые были подвергнуты воздействию ударных волн в ампулах сохранения плоской геометрии.

### Исходные образцы, подготовка эксперимента, методика исследования

Исходные образцы для проведения экспериментов были отобраны из протерозойских пород, развитых к востоку от г. Миасс на Южном Урале. Исходный плагиоклаз по химическому составу является существенно натровым и отвечает границе олигоклаза–андезина  $An_{28-33}$ . Исходные амфиболы относятся к группе моноклинных кальциевых амфиболов и являются магниопаргасситами (рис. 1). Исходный клинопироксен относится к кальциевым моноклинным пироксенам и по химическому составу является железистым членом ряда диопсид–геденбергита. Исходный скаполит относится к миццонитам (содержание мейонитового, т.е. кальциевого, компонента достигает 53–71 mol.%).

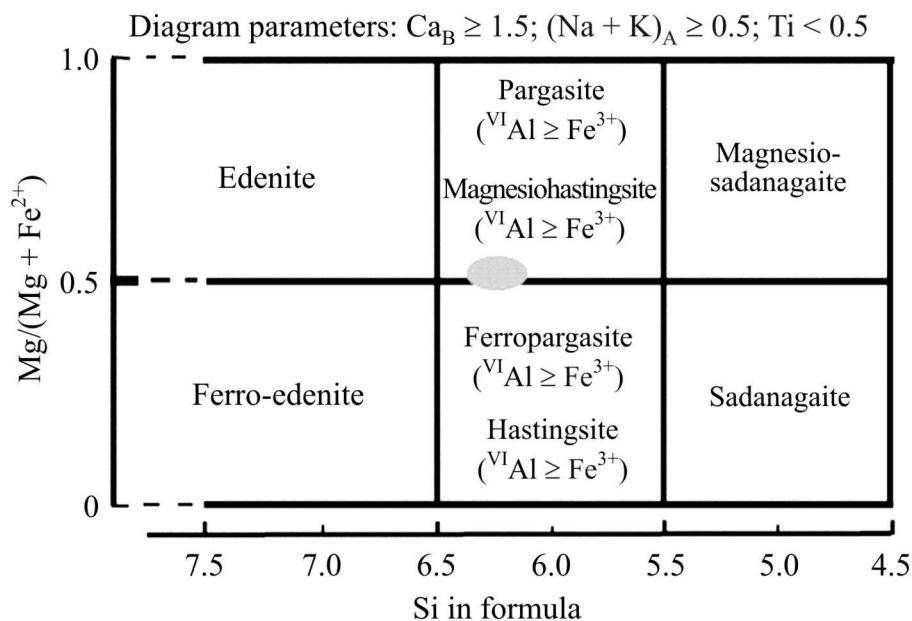


Рис. 1. Химические составы исходных амфиболов (область, закрашенная серым) в сравнении с систематикой [4]

Методика экспериментов по физическому моделированию импактных процессов представлена в работах [1–3]. Максимальные ударные давления в экспериментах составляли 26, 36 и 52 GPa и достигались в течение нескольких циркуляций волн в образце (ступенчатое ударно-волновое сжатие). Изучение минералов исходных пород и тех, что испытали ударно-волновое нагружение, проводилось с применением оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), микрозондового и рентгенофазового (РФА) анализов.



Результаты

При исследовании влияния плоских ударных волн на породообразующие минералы были выявлены их механические и химические преобразования. Механические трансформации заключаются в основном в формировании трещиноватости в минералах и их аморфизации, а химические преобразования – в привносе или выносе тех или иных компонентов. При 26 GPa во всех изученных минералах фиксируются только механические преобразования – наблюдается интенсивное растрескивание. При 36 и 52 GPa ярко выражены различия в ударно-метаморфических преобразованиях исследованных минералов.

**Плагиоклаз.** Наиболее сильные трансформации, как механические, так и химические, характерны для плагиоклаза. При 36 GPa 90 wt.% плагиоклаза аморфизовано. Реликты кристаллического плагиоклаза настолько малы, что практически неотличимы от аморфизованного плагиоклаза под оптическим микроскопом.

В СЭМ они выделяются на фоне светло-серой аморфизованной массы темно-серым цветом и грубыми открытыми трещинами (рис. 2). В этих реликтах фиксируется уменьшение размера кристаллитов от 100 nm в исходном образце до 15 nm. При 36 GPa также наблюдается изменение химического состава плагиоклаза. Из аморфизованного плагиоклаза интенсивно выносятся  $Na^+$  (рис. 3). В реликтах кристаллического плагиоклаза количество каких-либо элементов статистически не уменьшается.

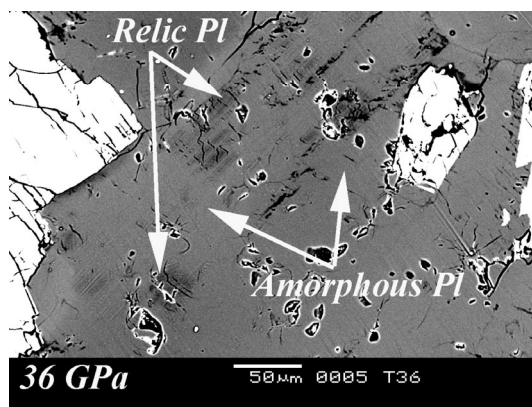


Рис. 2. Аморфизованный плагиоклаз (Pl) с реликтами кристаллического плагиоклаза (ударное давление 36 GPa)

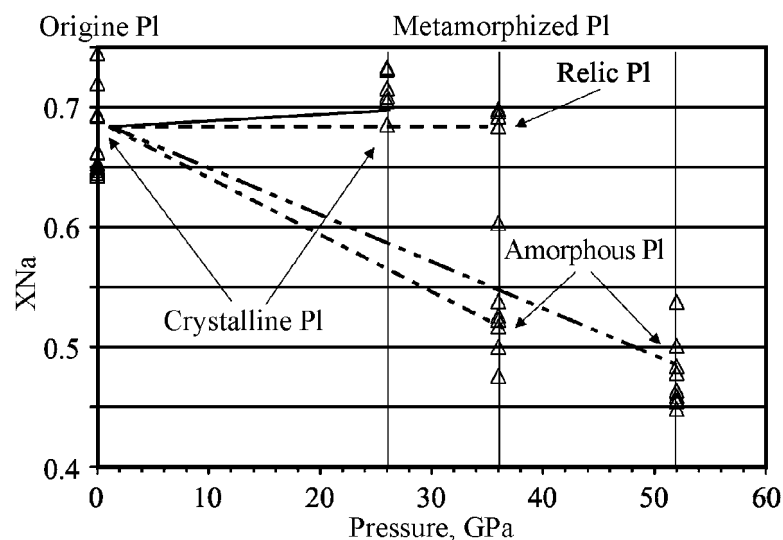
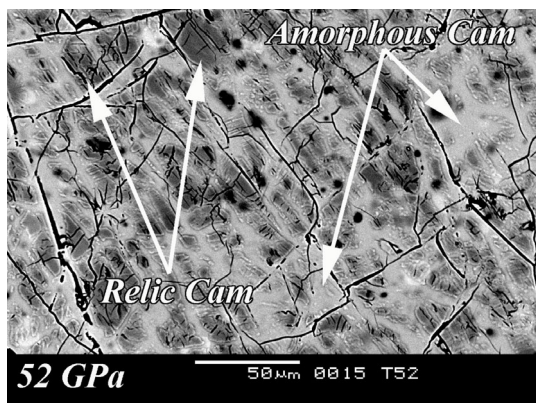


Рис. 3. Изменение содержания натрия в Pl при воздействии ударной волны

При 52 GPa плагиоклаз аморфизован полностью. При этом давлении помимо  $\text{Na}^+$  из плагиоклаза начинает выноситься и  $\text{Ca}^{2+}$ .

Кроме того, при 36 и 52 GPa в аморфизованном плагиоклазе фиксируется снижение суммы катионов (с 1.0 формульных единиц (f.u.) в исходном плагиоклазе до 0.77–0.86 f.u. при 36 GPa и 0.72–0.86 f.u. при 52 GPa). Также наблюдается изменение суммы  $\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+}$  (в исходном плагиоклазе сумма  $\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+}$  составляла  $4.00 \pm 0.01$ , а в аморфизованном –  $4.05 \pm 0.01$  при 36 GPa и  $4.06 \pm 0.02$  при 52 GPa). Эти факты свидетельствуют о начале плавления минерала, так как очевидно начало разложения алюмосиликатных тетраэдров.

**Амфибол.** Преобразования амфибола не так сильны, как изменения плагиоклаза. При 36 GPa все зерна амфибола покрыты обширной системой грубых открытых трещин (в амфиболе наблюдается пик трещиноватости), но аморфизация минерала при данном давлении не обнаружена.



**Рис. 4.** Реликты трещиноватого амфибола (Cam) среди прожилков и линз аморфизованного амфибола (ударное давление 52 GPa)

При 52 GPa фиксируется аморфизация амфибола (количество аморфизованного амфибола оценивается в 50 wt.% и более). Аморфизация минерала начинается вдоль трещин. Они становятся похожи на тонкие прожилки, заполненные аморфизованным материалом. При движении к краям зерен трещины часто становятся более широкими, и от кристаллического амфибола остаются только реликты (рис. 4). Изменения параметров кристаллической решетки и диспергация кристаллитов амфибола в наших экспериментах не обнаружены.

В амфиболе и при 36, и при 52 GPa фиксируются вынос  $\text{Fe}^{2+}$  и привнос  $\text{Mg}^{2+}$ , более выраженный в трещиноватом амфиболе при 36 GPa. Кроме того, при исследованных нагрузках в амфиболе выявлен вынос  $\text{Al}^{3+}$ , интенсивность которого выше при 52 GPa.

**Клинопироксен и скаполит.** Ударно-метаморфические трансформации в клинопироксене и скаполите выражены слабее, чем в других породообразующих минералах. Для этих минералов в исследованном диапазоне ударных нагрузок ни аморфизация, ни миграция компонентов не зафиксированы – среди всех видов трансформаций в них отмечается только растрескивание.

### Выводы

Ранее были изучены ударно-метаморфические трансформации породообразующих минералов этого же амфиболита в экспериментах со сферической сходящейся ударной волной [5]. При сравнении характера изменений поро-

дообразующих минералов, вызванных воздействием сферической сходящейся ударной волны и являющихся результатом ступенчатого ударно-волнового сжатия, были выявлены значимые различия. Так, в сферических сходящихся ударных волнах амфибол уже при 40 GPa испытывает ударно-термическое разложение с возникновением агрегата андезина, амфибола и рудного минерала, чего не происходит при ступенчатом ударно-волновом сжатии даже при 52 GPa. Подобная ситуация имеет место и для пироксена – в сферических ударных волнах в интервале 40–60 GPa он превращается в агрегат плагиоклаза, амфибола, клинопироксена и магнетита. Скаполит в сферических ударных волнах в этом же интервале давлений претерпевает химические преобразования (привнос  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и вынос  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Na}^+$ ), чего не наблюдается при ступенчатом ударно-волновом сжатии. Различия в диаплектовых преобразованиях минералов, вероятно, вызваны тем, что в цикле ступенчатого ударно-волнового сжатия реализуется более низкая (по сравнению с нагружением сферической сходящейся волной) ударная температура.

Тем не менее наблюдаемая в данной работе последовательность нарастания изменений в минералах при нагружении пород плоской ударной волной (ступенчатое ударно-волновое сжатие) соответствует установленному ранее [6] ряду ударно-термического разложения: слоистые–ленточные–цепочечные силикаты и алюмосиликаты–силикаты с одиночными тетраэдрами.

Работа поддержана РФФИ (проект № 09-05-00211).

1. *V.I. Fel'dman, L.V. Sazonova, V.V. Milyavskii, T.I. Borodina, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk, Izvestiya, Physics of the Solid Earth* **42**, 477 (2006).
2. *L.V. Sazonova, V.V. Milyavskii, T.I. Borodina, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk, Izvestiya, Physics of the Solid Earth* **43**, 707 (2007).
3. *В.В. Милявский, Л.В. Сазонова, И.В. Белятинская, Т.И. Бородина, Д.М. Жерноклетов, С.Н. Соколов, А.З. Жук, ФТВД* **17**, № 1, 126 (2007).
4. *B.E. Leake, A.R. Wooley, C.E.S. Arps, W.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.W. Whittaker, Y.Z. Guo, Canadian mineralogist* **35**, 219 (1997).
5. *V.I. Feldman, E.A. Kozlov, Yu.N. Zhugin*, in: Abstracts of 6<sup>th</sup> workshop of the ESF-Impact programme: Impact makers in the stratigraphic record, Spain, Granada, May 19–25 (2001), p. 29.
6. *Е.А. Козлов, Л.В. Сазонова, В.И. Фельдман, Н.А. Дубровинская, Л.С. Дубровинский*, в сб.: Тезисы докладов Российской конференции «Фазовые превращения при высоких давлениях», Россия, Московская обл., г. Черноголовка, 20–22 мая (2002), с. У13.

*I.V. Білятинська, В.І. Фельдман, В.В. Мілявський, Т.І. Бородіна*

## УДАРНИЙ МЕТАМОРФІЗМ ПОРОДОУТВОРЮЮЧИХ МІНЕРАЛІВ СМУЖЧАТОГО АМФІБОЛІТУ

Проведено ударно-хвильове навантаження смужчатого амфіболіту з Південного Уралу в ампулах збереження плоскої геометрії (ступінчасте ударно-хвильове стиснення) з подальшим вивченням ударно-метаморфічних трансформацій породоутворюючих мінералів – плагіоклазу, амфіболу, клінопіроксену, скаполіту. Максимальний ударний тиск складав 26, 36 і 52 GPa. В ході досліджень виявлено механічні і хімічні перетворення породоутворюючих мінералів. Найбільш сильні зміни спостерігаються в плагіоклазі: при 36 GPa мінерал практично повністю аморфізований, фіксується винесення  $\text{Na}^+$ , а при 52 GPa спостерігається винесення  $\text{Ca}^{2+}$ . Перетворення в амфіболіті виражені слабкіше: при 36 GPa він сильно тріщинуватий і практично не аморфізований, а при 52 GPa мінерал аморфізується лише наполовину. У клінопіроксені та скаполіті фіксуються лише слабкі діаплектові трансформації. Спостережувана послідовність наростання змін в мінералах при ступінчастому ударно-хвильовому стисненні відповідає встановленому раніше ряду ударно-термічного розкладання силікатів.

*I.V. Belyatinskaya, V.I. Fel'dman, V.V. Milyavskiy, T.I. Borodina*

## SHOCK METAMORPHISM OF STREAKY AMPHIBOLITE ROCK-FORMING MINERALS

Shock-wave loading of Southern Ural's streaky amphibolite were carried out in recovery ampoules (step-like shock compression). Shock-induced transformations of rock-forming minerals (amphibole, plagioclase, clinopyroxene, scapolite) were studied. The maximal shock pressures were 26, 36 and 52 GPa. In the course of studying mechanical and chemical transformations of rock-forming minerals were observed. The strongest transformations were observed in plagioclase: at 36 GPa the mineral almost completely became amorphous, escape of  $\text{Na}^+$  was fixed, and at 52 GPa  $\text{Ca}^{2+}$  started escaping too. Transformations of amphibole were less pronounced: at 36 GPa it was heavily cracked, but almost did not become amorphous, and at 52 GPa it became semiamorphous. Clinopyroxene and scapolite revealed just weak diaplectic transformations. The observed consistency of shock-induced changes of minerals under step-like shock compression corresponds to previously ascertained shock-thermal decomposition row of silicates.

**Fig. 1.** Composition of the pristine amphibole (grey area) in comparison with the systematics [4]

**Fig. 2.** Amorphous plagioclase (Pl) with crystalline plagioclase relics (shock pressure 36 GPa)

**Fig. 3.** Changing of Na concentration in Pl under shock wave influence

**Fig. 4.** Crystalline amphibole (Cam) relics among streaks and lenses of amorphous amphibole (shock pressure 52 GPa)

**ЖУРНАЛ  
«ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ»  
ОБЪЯВЛЯЕТ О ПОДПИСКЕ  
НА 2009 ГОД**

В журнале публикуются работы в области физики, механики и техники, вскрывающие роль высокого давления как инструмента для изучения и формирования физических и механических свойств материалов. Особый интерес представляют фундаментальные исследования, устанавливающие взаимосвязи микро- и макросвойств, а также основанные на этом прикладные разработки по применению высоких давлений для создания материалов с заданными характеристиками.

Статьи, направляемые в редакцию, не должны быть опубликованы или предназначены для опубликования в других издательствах.

**Тематика журнала**

- Электронные и кинетические свойства твердых тел.
- Физика магнитных явлений.
- Фазовые переходы.
- Спектроскопия твердых тел.
- Физика прочности и пластичности.
- Физическое материаловедение.
- Обработка материалов давлением, интенсивные пластические деформации.
- Аппаратура высокого давления, техника эксперимента, технологическое оборудование.

Кроме работ по физике и технике высоких давлений журнал публикует результаты исследований из смежных областей при том условии, что они могут быть использованы в профилирующей области.

**Правила оформления рукописей для авторов журнала  
«ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ»**

Редакция журнала просит авторов при подготовке статей руководствоваться изложенными ниже правилами. Материалы, оформленные без соблюдения последних, к рассмотрению не принимаются.

В журнале публикуются статьи на русском, украинском и английском языках.

В редакцию направляются 2 экземпляра рукописи (включая все ее элементы), набранной в программе Word 97-й версии шрифтом типа Times размером 14 п.т. через 1,5 интервала на одной стороне листа формата А4.

Поля: левое – не менее 3, верхнее и нижнее – 2, правое – 1,5 см. Все страницы необходимо пронумеровать.

Рукопись должна быть вычитана и подписана автором (соавторами).

Необходимо предоставление электронной версии статьи на дискете, компакт-дискете либо передача электронной почтой по адресу:

E-mail: pashinska@mail.ru.

### Комплектность рукописи

Рукопись должна содержать текст статьи, аннотацию, список литературы, подрисуночные подписи, комплект рисунков, сведения об авторах.

**1. Текст статьи.** На первой странице указываются:

- классификационный индекс по системе PACS;
- инициалы и фамилии авторов;
- название статьи;
- полный почтовый адрес учреждения, в котором выполнена работа.

*Название* статьи должно быть кратким, но информативным. Не допустимо применение в нем сокращений, кроме самых общепринятых (ВТСП, ГЦК, ЯМР и др.). Используемые авторами аббревиатуры необходимо расшифровать при первом их упоминании.

*Размерности* физических величин (в системе СИ) по всей рукописи должны быть на английском языке. В десятичных числах перед десятичными следует ставить точку.

**2. Таблицы** должны быть напечатаны на отдельных страницах и иметь заголовки. Обязательно указание единиц измерения величин.

**3. Формулы** желательно набирать в редакторе уравнений. Все индексы должны быть на английском языке. Экспоненту следует обозначать как «exр», а не как «е» в степени.

**4. Иллюстрации** должны быть изготовлены аккуратно на белой бумаге или кальке. Фотоснимки принимаются только четкие и контрастные. На обороте рисунка следует указать (мягким карандашом) его номер, фамилии авторов и название статьи, при необходимости пометить «верх» и «низ». В электронной версии все рисунки требуется предоставить в черно-белом варианте, отдельными файлами в следующих форматах: BMP, PCX, TIF, JPG, Origin, Corel Draw, Corel PhotoPaint, Adobe PhotoShop. Рисунок, помещаемый на всю ширину страницы, должен иметь размер по горизонтали 14 см, на ½ страницы – 7 см. Для рисунков в растровых (bitmap) форматах, т.е. BMP, PCX, TIF, JPG, Corel PhotoPaint, Adobe PhotoShop, допустимое разрешение – не менее 300 dpi. При этом в файле размер изображения по горизонтали, включая подписи по осям, должен быть не менее 800 пикселей для рисунка на ½ ширины страницы и 1600 пикселей – на всю ширину. Все надписи на рисунках должны быть на английском языке, а их число сведено к минимуму.

**5. Аннотация** (не более 15 строк) должна содержать цель работы, метод ее достижения, основные результаты. В редакцию представляется текст аннотации (с указанием авторов и названия статьи) на русском, украинском и английском языках (на отдельных страницах).

**6. Ключевые слова** (не более 10 терминов) на русском, украинском и английском языках должны отражать суть статьи. Не допускается использование аббревиатур.

**7. Список литературы** приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте. В библиографическом описании указываются инициалы и фамилии всех авторов, а далее:

а) для книги – названия книги, издательства и города, год издания (в круглых скобках):

*А.Ф. Иоффе*, Физика кристаллов, ГИЗ, Москва (1929).

б) для статьи в журнале – название, том, номер журнала, номер первой страницы статьи, год издания (в круглых скобках):

*V.V. Kabanov, J. Demsar, B. Podobnik, D. Mihailvic*, Phys. Rev. **B59**, 1497 (1999).

**8. Подписуночные подписи** так же, как и аннотации, представляются на русском, английском, украинском (для граждан Украины) языках и должны содержать объясняющие рисунок подписи.

**9. Сведения об авторах** необходимо представить на отдельной странице, где указываются:

- полные имя, отчество и фамилия авторов;
- служебные и домашние адреса и телефоны авторов;
- E-mail и адрес Internet.

Следует указать, с кем из авторов предпочтительно поддерживать связь при работе над статьей.

*Совокупность названия статьи, аннотации, рисунков и подписуночных подписей должна давать ясное представление о сути работы.*

*Обращаем внимание авторов* на то, что, начиная с 2002 г., журнал ФТВД реферируется и индексируется реферативным журналом Chemical Abstracts, Украинским Агентством по защите авторских прав, Украинским электронным журналом «Джерело». Полная версия журнала размещена на сайте: <http://www.donphti.ac.donetsk.ua/zhurnal.htm>.

**ИНФОРМАЦИЯ О ПОДПИСКЕ  
НА ЖУРНАЛ «ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ»**

Журнал «Физика и техника высоких давлений» включен в Каталог периодических изданий Украины на 2009 год (подписной индекс 74528). Кроме того, подписаться на журнал можно непосредственно в редакции журнала.

Журнал выходит раз в 3 месяца (4 номера в год).

**Стоимость подписки (без учета стоимости пересылки), грн.:**

- |                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| – для физических лиц  | на 3 месяца – 20    |
|                       | на 6 месяцев – 40   |
|                       | на 12 месяцев – 80  |
| – для юридических лиц | на 3 месяца – 40    |
|                       | на 6 месяцев – 80   |
|                       | на 12 месяцев – 160 |

Для оформления подписки в редакции необходимо в ее адрес выслать письмо-заказ на подписку с указанием банковских реквизитов и точного адреса.

**Адрес редакции журнала:**

Украина, 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

За дополнительной информацией следует обращаться по телефону (062) 311–22–02.



**Индекс 74528**

Свидетельство о государственной регистрации  
Серия КВ № 1908 от 04.12.1995 г.

**Рукописи статей проходят обязательное рецензирование**

Научный редактор *Я.Е. Бейгельзимер*  
Редакторы: *С.С. Фомина, Т.Н. Алехова*  
Компьютерный набор *В.И. Колывайло*  
Компьютерная верстка *В.А. Василенко*  
Корректор *Е.И. Сапего*

Отпечатано в ООО «Цифровая типография»  
г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291а

Подп. в печать 12.03.2009 г. Формат 70x108/16. Бумага офс. Офсетная печать. Усл. печ. л. 12.21.  
Уч.-изд. л. 13.91. Тираж 170 экз.