

PACS numbers: 01.60.+q

## До 95-річчя від дня народження Михайла Олександровича Кривоглаза

А. І. Карасевський, В. А. Татаренко

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

*18 травня 2024 р. виповнилося 95 років від дня народження визначному фізику-теоретику, двічі лауреату Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (у 1978 та 1988 рр.), лауреату премії імені Є. С. Федорова АН СРСР (у 1986 р.), члену-кореспонденту АН УРСР (від 1978 р.) Михайлу Олександровичу Кривоглазу. Далі охарактеризовано основні його праці.*

Михайло Олександрович народився у Києві 18 травня 1929 року. Батько Михайла Олександровича був юристом, мати — вчителькою російської мови та літератури. Після закінчення із золотою медаллю у 1945 році середньої школи № 25 м. Києва Михайло Олександрович вступив до Київського державного університету на фізичний факультет, який закінчив з відзнакою у 1950 році.

Через рік після закінчення університету М. О. Кривоглаз почав працювати в Лабораторії металофізики АН УРСР інженером (1951–1954), молодшим науковим співробітником (1954–1959), старшим науковим співробітником (1959–1963). Після захистів кандидатської (1954) і докторської (1962) дисертацій у 1964 р. він очолив лабораторію (відділ) Інституту металофізики АН УРСР.

---

Corresponding author: Anatolii Illich Karasevskii  
E-mail: [akarasevskii@gmail.com](mailto:akarasevskii@gmail.com)

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
Academician Vernadsky Blvd., Bldg. 36, UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. I. Karasevskii and V. A. Tatarenko, On the Occasion of the 95<sup>th</sup> Anniversary of Birthday of Mykhaylo Oleksandrovykh Kryvohlaz, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 5: 507–515 (2024) (in Ukrainian).  
DOI: [10.15407/mfint.46.05.0507](https://doi.org/10.15407/mfint.46.05.0507).



*Чл.-кор. АН УРСР, д.ф.-м.н., проф. М. О. Кривоглаз (18.05.1929–30.06.1988)*

П'ятдесяті роки минулого століття були роками активного дослідження фізичних властивостей конденсованої речовини. Були відкриті та вивчалися явища надпровідності металів, надплинності рідкого гелію, фазових переходів I та II роду в твердих тілах і рідинах.

До початку 1960-х років в Інституті металофізики сформувався колектив плідно працюючих молодих співробітників, які активно досліджували фізичні властивості конденсованих речовин (надпровідність металів, надплинність рідкого гелію, фазові переходи I і II роду в твердих тілах і рідинах), обґрунтовували дислокаційну концепцію пластичної деформації матеріалів, з'ясували дефектну структуру кристалів, впорядкування та розпад металевих стопів, активно вивчали напівпровідникові властивості матеріалів, розвивали нові методи визначення фазового складу та структури неідеальних кристалів і стопів.

## 1. ПОЛЯРОНИ

Керівником дипломної роботи М. О. Кривоглаза був один з провідних учених у галузі теорії твердого тіла — Соломон Ісакович Пекар, який незадовго до початку співпраці з М. О. Кривоглазом ввів у фізику уявлення про полярони — автолокалізовані стани електронів у полярному середовищі, яка привернула до цього явища увагу фізиків усього світу. Подальша спільна робота М. О. Кривоглаза та С. І. Пекара привела до розробки нового математичного підходу в теоретичному описі поляронів, який дав змогу досліджувати полярони за будь-яких температури та величини електрон-фононої взаємодії — із сильним, проміжним і слабким зв'язком електронів провідності з поздовжніми коливаннями атомів кристалу. Розроблений теоретичний підхід ґрунтувався на обчисленні статистичної суми системи як сліду оператора (Гамільтоніяна), який описує взаємодію електронів з поздовжніми коливаннями атомів кристалу. Одержані результати використовувалися для аналізу впливу поляронного ефекту на термодинамічні та кінетичні властивості електронів у кристалах.

## 2. ОПТИЧНІ СПЕКТРИ ПОГЛИНАННЯ ТА БЕЗФОНОННІ ЛІНІЇ

У 1953 році М. О. Кривоглаз і С. І. Пекар передбачили наявність надзвичайно вузьких ліній у спектрах оптичного поглинання домішок у кристалах [2]. Вузькість спектральних ліній пов'язана з тим, що імпульс поглинання або випромінювання фотона передається кристалу в цілому, і в результаті відсутнє Допплерове розширення ліній, спричинене тепловим рухом атомів. На жаль, статтю М. О. Кривоглаза та С. І. Пекара про безфононні лінії оптичного поглинання домішок у кристалах було опубліковано в «Трудах Інститута фізики АН УРСР», які не перекладалися англійською мовою; тому ця робота протягом тривалого часу залишалася маловідомою. Аналогічний ефект, — вузькі безфононні лінії в спектрах  $\gamma$ -поглинання домішковими ядрами, — був відкритий Мессбауером у 1957 році, за що він отримав Нобелівську премію. А безфононні лінії в оптичному спектрі почали називати оптичним аналогом Мессбауєрового ефекту. М. О. Кривоглазом було встановлено, що розширення безфононних ліній (модуляційне розширення) може бути пов'язане з ангармонізмом фононів або зміною їхніх частоти та координат під часи фотопереходу, тобто під час квазіпружного розсіювання фононів на електронному центрі. У 1965 році був опублікований огляд М. О. Кривоглаза «Эффект Мёссбауера и его применение в физике твёрдого тела» [3], в якому було докладно проаналізовано можливості використання Мессбауєрового ефекту для вивчення електронної

структури твердих тіл, мікроструктури кристалу, ангармонізму коливань його атомів, дифузійної рухливості атомів у середовищі та ін.

### **3. ТЕОРІЯ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕХОДІВ**

У 1953 році М. О. Кривоглазом було показано, що в полярному середовищі теплові флюктуації поляризації навколо донорного та акцепторного центрів приводять до зміщення донорного та акцепторного електронних рівнів, що може створити резонансні умови для безвипромінювального квантового переходу електрона між цими рівнями [4]. На жаль, М. О. Кривоглаз обмежився розглядом безвипромінювального переходу електрона на одному центрі. На початку 1960-х років американський фізик Р. Маркус запропонував теорію, яка розглядала перенесення електрона в полярному розчиннику між просторово відокремленими донором і акцептором. У 1985 році Р. Маркусу було присуджено Нобелівську премію з хемії за пояснення механізму редокс-реакцій.

### **4. ТЕОРІЯ СТОПІВ І СИЛЬНО АНІЗОТРОПНИХ КРИСТАЛІВ**

М. О. Кривоглазом були значно розвинуті термодинамічна та статистична теорії впорядкування та розпаду стопів, мікроскопічна теорія дифузії у стопах з упорядкуванням і розпадом, розвинуті теорії розчинності й утворення вакансій у різного типу стопах з упорядкуванням; він розвинув багатоелектронну теорію залишкового електроопору багатокомпонентних твердих розчинів з упорядкуванням, побудував кінематичну теорію розсіювання випромінень у твердих розчинах та ін.

#### **4.1. Упорядкування атомів у стопах**

На початку 1960-х років значну частину наукових інтересів М. О. Кривоглаза становила теорія упорядкування та розпаду стопів. Він успішно розвивав як термодинамічну, так і статистичну теорію упорядкування та розпаду стопів. В рамках різних теоретичних моделей було розглянуто розпад і упорядкування різних, головним чином, бінарних, стопів. Результати цих досліджень представлено у широко відомій монографії [5].

#### **4.2. Дифузія у стопах**

Принципово нові результати були одержані М. О. Кривоглазом

стосовно розробки теорії дифузії в твердих розчинах, що впорядковуються.

Було встановлено, що головна відмінність механізму дифузії у стопах, в порівнянні з дифузією в однокомпонентних системах, полягає в тому, що в розчинах рельєф потенціальної енергії в процесі дифузії атома змінюється в залежності від локальної концентрації розчину; тому Арреніусова температурна залежність коефіцієнта дифузії у стопах не застосовна [6].

#### **4.3. Розчинність. Розпад стопів**

У роботах М. О. Кривоглаза [7, 8] було запропоновано статистико-термодинамічний модель розчинності атомів третього компонента у міжвузлях або вузлах кристалічних ґратниць бінарних стопів заміщення. Досліджено вплив домішки деякого елемента, розміщеного в октаедричних міжвузлях стопу заміщення, що розпадається. Одержано рівняння для визначення залежності температури розпаду від складу стопу, тобто діаграми стану стопу.

#### **4.4. Міжатомові взаємодії у стопах і сильно анізотропних кристалічних системах**

Спільне застосування статистико-термодинамічного флюктуаційного методу та термодинамічної теорії збурень дало змогу М. О. Кривоглазу вивести аналітичний вираз, який отримав у світовій літературі назву «формула Кривоглаза–Клеппа–Мосса». За допомогою цієї формули достатньо просто можна пов'язати експериментально спостережувану інтенсивність дифузного розсіяння з фур'є-компонентами енергій змішання атомів у неупорядкованому стопі [9, 10]. Важливою перевагою такого підходу є можливість врахування далекосяжних внесків у міжатомові взаємодії, що актуально для застосування до реальних стопів.

Крім того, у реальних кристалах істотну роль відіграє деформаційна взаємодія точкових дефектів. На основі методів статистики ґратниці (Мацубари–Кривоглаза–Канзакі–Харді) М. О. Кривоглазу вдалося врахувати цю взаємодію точкових дефектів.

### **5. ТЕОРІЯ РОЗСІЯННЯ РЕНТГЕНОВИХ ПРОМЕНІВ У НЕІДЕАЛЬНИХ КРИСТАЛАХ**

Найбільш значний внесок у теорію твердого тіла пов'язаний з видатними роботами М. О. Кривоглаза зі створення та розвитку кінематичної теорії розсіяння Рентгенових променів і нейтронів кристалами з дефектами. Ним було розроблено ефективний метод

флюктуаційних хвиль для опису спектрального розподілу зміщень, утворених дефектами в кристалах [9–12].

### 5.1. Класифікація дефектів кристалу

М. О. Кривоглазом вперше в рамках кінематичної теорії було проведено класифікацію дефектів за створюваним ними ефектом на картині рентгенівського розсіяння. Було показано, що належність дефектів кристалу до першого або другого класу визначається закономірностями спадання полів зміщень з віддаленням від дефекту.

До першого класу відносяться дефекти, поле зміщень від яких відносно швидко зменшується з віддаллю ( $\propto 1/r^3$  або швидше). До них належать, наприклад, точкові дефекти, зародки частинок другої фази, флюктуаційні неоднорідності складу. Такі дефекти приводять до зміщення рентгенівських ліній через зміну середнього параметра ґратниці, викликаного наявністю дефектів, до ослаблення інтенсивності цих ліній, а також до появи плавного дифузного розсіяння. Водночас розширення ліній не спостерігається.

У випадку дефектів другого класу (коли поле зміщень  $\propto r^{-3/2}$ ) спостерігається істотне розширення рентгенівських ліній, що пов'язано зі зростанням фактора Дебая–Валлера. До дефектів другого класу можуть бути віднесені прямолінійні дислокації, дислокаційні петлі, великі частинки другої фази тощо.

Для кількісного опису й аналізу впливу дефектів різного типу М. О. Кривоглазом зі співробітниками були розроблені різні підходи. Наприклад, було показано, що у кристалах з хаотичним розподілом дислокацій ширина квазіліній на дебаєграмі пропорційна квадратному кореню з густини дислокацій. М. О. Кривоглазом було побудовано теорію розсіяння у випадку нехаотичного розподілу дислокацій та об'єднання їх у стінки; розглянуто випадок, коли є як стінки, так і хаотично розподілені дислокації; побудовано теорію розсіяння у квазіодновимірних і квазидвовимірних системах тощо. Більшість передбачених М. О. Кривоглазом рентгенографічних ефектів знайшла своє експериментальне підтвердження й отримало широке практичне застосування як теоретична основа сучасних методів діагностики дефектів [9–13].

## 6. ТЕОРІЯ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТНИЦІ

### 6.1. Рух включень у твердих тілах

Дисперсні системи, що складаються з частинок розміром у 10–

$10^3 \text{ \AA}$ , включених у матричну фазу, проявляють ряд специфічних властивостей і мають велике практичне значення. Змінюються характеристики міцності, підвищується жароміцність тощо. Високотемпературна плазучість таких систем істотно відрізняється від гомогенних систем, що пов'язане, головним чином, з дифузійною рухливістю включень або пор [14]. Сили, що приводять до руху включень, створюються різними чинниками. Дифузійний рух відбувається під дією зовнішніх сил — градієнтів температури або концентрації, електричного або магнетного поля, різної концентрації дислокацій або вакансій, на межі поділу фаз тощо.

## **6.2. Зміщення температури мартенситного перетворення в магнетному полі**

М. О. Кривоглазом були проведені дослідження [15, 16], які пояснювали виявлений В. Д. Садовським ефект зміщення температури мартенситного перетворення у криці в сильному імпульсному магнетному полі. Причина цього ефекту полягає в тому, що мартенситна фаза, на відміну від аустенітної, є феромагнетною, і тому зовнішнє магнетне поле понижує її термодинамічний потенціал, викликаючи фазове перетворення в аустенітній фазі у магнетному полі.

## **7. ЕЛЕКТРОННІ СТАНИ В КРИСТАЛАХ. ФЛЮКТУОНИ**

### **7.1. Флюктуони**

В 1960-х роках у фізиці конденсованого стану накопичилися експериментальні дані, що свідчать про наявність автолокалізованих станів електронів у ряді неполярних систем, таких як рідкі гелій та інертні гази Ne, Xe, Ar, неполярні рідини, деякі магнетні напівпровідники. В той же час локалізовані стани електронів у рідинах, таких як вода (гідратований електрон), або в метал-аміякових розчинах, істотно відрізнялися за своїми властивостями від поляронів у йонних кристалах.

У 1969 році, виходячи з геніальної ідеї С. І. Пекара про полярон, М. О. Кривоглаз запропонував загальний теоретичний підхід щодо опису автолокалізації електронів у неупорядкованих середовищах [17]. Були одержані основні рівняння, які визначають умови виникнення та характеристики флюктуонів — утворень, в яких електрон локалізується на флюктуації близького порядку середовища, яку він же самоузгоджено підтримує.

Найпростіші автолокалізовані стани можуть виникати у напівпровідниках біля точок фазового переходу першого роду, коли на

ділянці нової фази потенціальна енергія електрона понижується на певну величину відносно дна зони провідності напівпровідника. Флюктуони можуть виникати в магнетних напівпровідниках, напівпровідникових розчинах, а також у сегнетоелектриках. У напівпровідникових розчинах або магнетиках в ефективному полі локалізованого електрона може відбуватися неперервна зміна внутрішнього параметра. На відміну від полярона, де йони набувають лише невеликих зміщень з положення рівноваги, у випадку флюктуонів в середовищі в області локалізації електрона відбувається істотна реорганізація, і електрон стабілізує кластер з атомів одного сорту.

## 7.2. Термодинамічно рівноважні гетерогенні стани [18]

Дисперсні системи широко поширені в природі. Однак через додаткову міжфазну енергію вони термодинамічно нестійкі та з часом мають коагулювати, утворюючи масивну гомогенну фазу.

М. О. Кривоглаз вперше звернув увагу на те, що вільні (незв'язані) заряди є тими компонентами системи, перерозподіл яких між фазами приводить до пониження енергії, яке пропорційне площі міжфазної межі, а далекосяжні Кулонові сили, що водночас виникають, фіксують розмір частинки. Розмір утворених частинок має величину порядку радіуса Томаса–Фермі виродженого електронного газу. Форма дисперсних частинок залежить від екранування їхнього заряду в середовищі.

За достатньо високої концентрації вільних електронів у однорідному напівпровіднику енергетично вигіднішими порівняно з флюктуонами можуть стати області зміненого параметра середовища, стабільність яких підтримується виродженим газом електронів, які перейшли з оточувального середовища на частинки з металічною густиною електронного газу. У сильно вироджених напівпровідниках за невеликої величини константи взаємодії електронів у порівнянні з енергією Фермі електронного газу зі зміною концентрації розчину або намагнетованості умови гетерогенізації значно змінюються.

Перехід системи в гетерогенний стан відбувається як фазовий перехід першого роду, в результаті якого утворюється модульована структура [19].

Після смерті М. О. Кривоглаза пройшло вже 36 років, але досі на міжнародних конференціях і в наукових журналах цитуються його роботи й обговорюються його наукові ідеї, а тим послідовникам, хто працював разом із Михайлом Олександровичем (і навіть просто поряд з ним), використовуючи його ідеї та напрацювання, вони слугують дороговказом у світі фізичної науки.



## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Кривоглаз, С. И. Пекар, Метод шпуров для электронов проводимости в полупроводниках, *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, **21**, вып. 1: 3–32 (1957).
2. М. А. Кривоглаз, С. И. Пекар, Форма спектров примесного поглощения света и люминесценции в диэлектриках, *Труды Института физики АН УССР*, вып. 4: 37–70 (1953).
3. М. А. Кривоглаз, *Физика твердого тела. Теория твердого тела. Серия «Итоги науки»* (Москва: ВИНТИ: 1965), с. 7–125.
4. М. А. Кривоглаз, Теория тепловых переходов, *ЖЭТФ*, **25**, вып. 2: 191–207 (1953).
5. М. А. Кривоглаз, А. А. Смирнов, *Теория упорядочивающихся сплавов* (Москва: Физматгиз: 1958).
6. М. А. Кривоглаз, А. А. Смирнов, Теория диффузии внедренных атомов в упорядочивающихся сплавах, *ЖЭТФ*, **24**, вып. 4: 409–418 (1953).
7. М. А. Кривоглаз, Растворимость водорода в упорядочивающихся сплавах, *ЖТФ*, **24**, вып. 6: 1077–1089 (1954).
8. М. А. Кривоглаз, А. А. Смирнов, Влияние примеси внедренных атомов на распад сплавов, *ЖФХ*, **29**, вып. 8: 1532–1534 (1955).
9. М. А. Кривоглаз, Теория диффузного рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов твердыми растворами, *ЖЭТФ*, **32**, вып. 6: 1368–1381 (1957).
10. М. А. Кривоглаз, *Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами* (Москва: Наука: 1967).
11. М. А. Кривоглаз, *Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах* (Киев: Наукова думка: 1984).
12. М. А. Кривоглаз, *Диффузное рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов на флуктуационных неоднородностях в неидеальных кристаллах* (Киев: Наукова думка: 1984).
13. М. А. Кривоглаз, К теории рассеяния рентгеновских лучей кристаллами, содержащими дефекты, *ФММ*, **12**, вып. 4: 465–475 (1961).
14. Я. Е. Гегузин, М. А. Кривоглаз, *Движение макроскопических включений в твердых телах* (Москва: Металлургия: 1971).
15. М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, О влиянии сильных магнитных полей на фазовые переходы, *ФММ*, **18**, вып. 4: 502–505 (1964).
16. М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, Л. Ф. Смирнов, Е. А. Фокина, *Закалка стали в магнитном поле* (Москва: Наука: 1977).
17. М. А. Кривоглаз, Флуктуонные состояния электронов, *УФН*, **111**, № 4: 617–654 (1973).
18. М. А. Кривоглаз, О возможности существования равновесной дисперсной фазы, содержащей металлические частицы, *ЖЭТФ*, **63**, вып. 2: 670–683 (1972).
19. В. V. Egorov, I. B. Egorova, M. A. Krivoglaz, The electronic heterogeneous states in ferromagnetic semiconductors, *phys. stat. sol. (b)*, **139**, No. 1: 173–184 (1987).