

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛОПОДОБНЫХ СТРУКТУРАХ ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Драган Г. С., Кутаров В. В., Колесников К. В.

*Научно-исследовательский институт физики Одесского
национального университета имени И. И. Мечникова, ул. Пастера 27,
Одесса, Украина, 65082, e-mail: dragan@onu.edu.ua*

Проведено исследование механизмов процесса плавления кристаллоподобных структур, которые образуются в гетерогенной плазме продуктов сгорания металлизированных композиций с добавками атомов щелочных металлов в газовой фазе. В качестве кристаллоподобных структур представлены кластеры, из которых образуются наночастицы, агломераты наночастиц оксидов металлов и упорядоченные пространственные структуры заряженных конденсированных частиц.

В гетерогенных средах описание физических процессов возможно при помощи фрактальных моделей, что позволяет значительно упростить их и одновременно представить в более наглядном виде. Необходимость использования фрактального представления физических моделей в гетерогенной среде возникает не только потому, что структуры (матрица или каркас) могут являться фрактальными в геометрическом пространстве, которое становится фрактальным вследствие анизотропии характерных свойств структуры (химических, электростатических связей), но и потому, что фрактальным является также и обратное (спектральное) пространство.

Предполагается, что в плазме упорядоченные структуры заряженных частиц образуются в случае, когда силы кулоновского отталкивания уравниваются силами диффузионно-дрейфового взаимодействия. Можно предположить, что условия «кристаллизации» пространственных структур реализуются, когда взаимодействие между ними в упорядоченных структурах намного больше энергии хаотического теплового движения. Другим условием «кристаллизации» является предположение о связи между амплитудой осцилляций частиц и постоянной решетки «кристалла». В кристаллическом состоянии постоянная решетки много больше амплитуды колебаний.

Для определения условий кристаллизация-плавление в дымовой плазме рассмотрены феноменологические критерии: 1. Критерий Линдемманна; 2. Критерий Хансена и Верле; 3. Динамический критерий кристаллизации Левена. Исследована фазовая диаграмма систем конденсированных частиц для дымовой плазмы.

Наиболее важным вопросом в теории фазового перехода (ФП) кристалл-жидкость является вопрос о выборе критерия, определяющим этот переход. Для описания фазового перехода кристалл-жидкость использован критерий Линдемана, который (X_L) определяется как отношение амплитуды колебаний твердой частицы (компонента плазмы) к расстоянию между центрами ближайших частиц плазмы.

$$X_L = \left(\frac{\langle r^2 \rangle_E}{C^2} \right)^{1/2} \approx 0,133 - 0,186$$

Численное значение критерия Линдемана 0,133–0,186 характерно для систем с кулоновским взаимодействием. Величина $X_L = 0,186$ характерна для однокомпонентной плазмы (ОКП). Этому состоянию плазмы соответствует параметр не идеальности $\Gamma = 178$ (если измерять расстояние в единицах радиуса Вигнера-Зейтца (R_w)). Величина $X_L = 0,133$ характерна для модели твердых сфер (HS) – системы Ленард-Джонса.

Определение среднеквадратичной амплитуды колебаний твердых частиц в плазме $\langle r^2 \rangle_E$ проводится с учетом эйнштейновской частоты колебаний частиц плазмы:

$$\langle r^2 \rangle_E = \frac{3h^2 T}{m_p k \theta_E^2 f_y},$$

где $\theta_E = h\nu/k$ – температура Эйнштейна, h и k – постоянные Планка и Больцмана соответственно; T – температура плазмы, m_p – масса частицы; f_y – функция, учитывающая отклонение от линейной зависимости среднеквадратичной амплитуды колебания частиц плазмы от температуры плазмы при низких температурах и меняющаяся в пределах $0 < f_y \leq 1$.

Следует отметить, что выражение для определения температуры плавления кристалла справедлива для компакта, в то же время как твердую частицу (агрегат) в плазме следует рассматривать как регулярный фрактал. Следовательно, корректное определение температуры плавления требует знания фрактальных характеристик в плазме, такими как фрактальная размерность и функция распределения частиц (агрегатов) по размерам. В работе приведено сравнение результатов расчета температуры плавления плазменных кристаллов методом Дебаевского приближения, при котором учитывается фрактальность пространства, и методом Эйнштейновского приближения, при котором фрактальным является фононный спектр.