

v.2, n.2, 2025 - Fevereiro

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

CONTROL DE LA CRISTALIZACIÓN EN LA SÍNTESIS DE SÓLIDOS AMORFOS

Cristopher Manuel Choez Tobo¹
Daniel Vladimir Arévalo Carpio²
Charles Joel Gutiérrez Mena³
Jean Pierre Bohórquez Asanza⁴
Wilson Patricio León Cueva⁵

Revista O Universo Observável
DOI: 10.69720/29660599.2025.00049
[ISSN: 2966-0599](https://doi.org/10.69720/29660599.2025.00049)

¹Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Técnica de Machala.

E-mail: cchoez1@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5761-6161>

²Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Técnica de Machala.

E-mail: arevalo.daniel1234@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0451-8547>

³Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Técnica de Machala.

E-mail: Joelgutierrezmena02@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2088-2791>

⁴Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Técnica de Machala.

E-mail: bohорquez.jeanpierre@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3607-0062>

⁵Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad Técnica de Machala.

E-mail: wleon@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>



CONTROL DE LA CRISTALIZACIÓN EN LA SÍNTESIS DE SÓLIDOS AMORFOS

Cristopher Manuel Choez Tobo, Daniel Vladimir Arévalo Carpio, Charles Joel Gutiérrez Mena,
Jean Pierre Bohórquez Asanza e Wilson Patricio León Cueva



Fonte: <https://www.mundodosmateriais.com.br/2021/09/01/difracao-de-raios-x-e-a-descoberta-dos-cristais/>

PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMEN

El control de la cristalización es un aspecto clave en la síntesis de sólidos amorfos, materiales con propiedades únicas como mayor solubilidad y estabilidad térmica, fundamentales en industrias como la farmacéutica y la electrónica. Este artículo revisa los mecanismos de cristalización, abordando la nucleación y el crecimiento cristalino, así como los factores que influyen en estos procesos, como la temperatura, presión y composición química. Se presentan diversas estrategias para controlar la cristalización, incluyendo métodos térmicos como el enfriamiento rápido, técnicas mecánicas como la desordenación, y enfoques químicos con el uso de aditivos y dopantes. Además, se destacan innovaciones recientes, como el empleo de campos eléctricos y magnéticos, microreactores y técnicas de deposición para regular la estructura de los materiales. Asimismo, se analizan técnicas avanzadas de caracterización como la difracción de rayos X, la microscopía electrónica y la espectroscopía infrarroja, esenciales para evaluar la morfología y estabilidad de los sólidos amorfos. Finalmente, el artículo subraya la importancia del control de la cristalización en el desarrollo de materiales con aplicaciones tecnológicas avanzadas, optimizando sus propiedades para usos específicos en distintas industrias.

PALABRAS CLAVE: Cristalización, sólidos amorfos, control de cristalización, nucleación

ABSTRACT

Crystallization control is a key aspect in the synthesis of amorphous solids, materials with unique properties such as increased solubility and thermal stability, essential in industries like pharmaceuticals and electronics. This article reviews crystallization mechanisms, addressing nucleation and crystal growth, as well as the factors influencing these processes, such as temperature, pressure, and chemical composition. Various strategies for controlling crystallization are presented, including thermal methods like rapid cooling, mechanical techniques such as disordering, and chemical approaches involving additives and dopants. Additionally, recent innovations are highlighted, such as the use of electric and magnetic fields, microreactors, and deposition techniques to regulate material structures. Furthermore, advanced characterization techniques are analyzed, including X-ray diffraction, electron microscopy, and infrared

spectroscopy, which are essential for evaluating the morphology and stability of amorphous solids. Finally, the article emphasizes the importance of crystallization control in the development of materials for advanced technological applications, optimizing their properties for specific uses in various industries.

KEYWORDS: Crystallization, Amorphous solids, Crystallization control, Nucleation

1. INTRODUCCIÓN

La cristalización es un proceso fundamental en la formación de sólidos, donde los átomos o moléculas se organizan en una estructura ordenada, formando cristales con propiedades bien definidas. Sin embargo, en la síntesis de sólidos amorfos, este fenómeno puede ser indeseable debido a que los materiales amorfos presentan ventajas únicas, como mayor solubilidad y estabilidad térmica (Liu et al., 2021). Estas características hacen que los sólidos amorfos sean preferidos en sectores como la farmacología y los dispositivos electrónicos (Dhungana et al., 2023).

El control de la cristalización es crucial para maximizar las propiedades de los sólidos amorfos. En la industria farmacéutica, por ejemplo, la cristalización incontrolada puede reducir la biodisponibilidad de medicamentos diseñados para permanecer en su estado amorfo (Jia et al., 2021). Por otro lado, en aplicaciones electrónicas, el ajuste controlado de la cristalización en materiales como el silicio amorfo es esencial para optimizar el rendimiento de dispositivos semiconductores (Harada et al., 2020). Además, en tecnologías ópticas, la estructura amorfa puede mejorar la transparencia y la refracción de ciertos materiales (Lan et al., 2024).

Este artículo revisará las estrategias contemporáneas para controlar la cristalización durante la síntesis de sólidos amorfos. Se explorarán métodos térmicos, mecánicos y químicos, junto con enfoques emergentes, como el uso de campos externos y la ingeniería molecular. Además, se discutirá la aplicabilidad y limitaciones de cada método, evaluando su impacto en diferentes industrias.

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Diferencia entre sólidos cristalinos y amorfos.

Las propiedades físicas de los sólidos están directamente determinadas por la disposición de sus

átomos, iones o moléculas a nivel microscópico. Esta estructura influye en su comportamiento térmico, mecánico y óptico.

En los sólidos cristalinos, los átomos o moléculas están organizados en una estructura tridimensional regular y repetitiva. Esto da lugar a la formación de redes cristalinas bien definidas, que se reflejan en la geometría externa del material y en su capacidad para difractar la luz. Además, los sólidos cristalinos poseen un punto de fusión bien definido, debido a la regularidad y estabilidad de sus enlaces atómicos (Navrátilová et al., 2020).

Por otro lado, los sólidos amorfos carecen de una estructura ordenada. Sus átomos están dispuestos de manera desorganizada, lo que hace que no presenten un punto de fusión preciso, sino que se ablandan de forma progresiva con el aumento de la temperatura. Un ejemplo típico es el vidrio, donde los átomos de silicio y oxígeno están distribuidos de manera aleatoria (Du et al., 2019).

Mecanismos de cristalización

Nucleación

La nucleación es el primer paso en la formación de un cristal. Se da cuando pequeñas agrupaciones de átomos o moléculas empiezan a organizarse en una estructura ordenada dentro de una solución sobresaturada. Existen dos tipos principales:

- **Nucleación primaria:**

Homogénea: Se produce espontáneamente en una solución sobresaturada sin la presencia de superficies externas. Requiere altos niveles de energía para superar la barrera de activación (Seguí Gil, 2023).

Heterogénea: Se facilita por la presencia de partículas sólidas u otras superficies que actúan como sitios catalizadores, reduciendo la energía necesaria para la formación de núcleos (Speranza, Salomone & Pantani, 2023).

- **Nucleación secundaria:**

Por esfuerzo cortante: Se da cuando el movimiento del fluido arrastra los núcleos ya formados y los redistribuye en la solución, favoreciendo la cristalización en otros puntos (Speranza, Salomone & Pantani, 2023).

Por contacto: Se genera por colisiones entre cristales en crecimiento o con las paredes del recipiente, promoviendo la formación de nuevos núcleos (Spoerer, Boldt, Androsch & Kuehnert, 2021).

Crecimiento cristalino

Una vez formado el núcleo, el cristal crece mediante la integración de moléculas de soluto. Este proceso ocurre en dos etapas principales:

Difusión: Las moléculas de soluto viajan a través del medio y llegan a la superficie del cristal mediante difusión (Huang et al., 2020).

Etapas interfacial: Una vez en la superficie, las moléculas se incorporan ordenadamente a la red cristalina, asegurando su estabilidad (Navrátilová et al., 2020).

Factores que influyen en la cristalización

Temperatura: Afecta la velocidad de cristalización. Un enfriamiento lento permite la formación de cristales más grandes y bien estructurados, mientras que un enfriamiento rápido genera cristales pequeños o estructuras amorfas (Du et al., 2019).

Presión: Influye en la forma y estabilidad de los cristales. Un aumento en la presión puede modificar la morfología cristalina y alterar la temperatura a la que ocurre la cristalización (Navrátilová et al., 2020).

Composición química: La presencia de impurezas o aditivos puede afectar el crecimiento del cristal, alterando su tamaño y estructura (Huang et al., 2020).

Velocidad de enfriamiento: Un enfriamiento rápido promueve la formación de estructuras amorfas, mientras que un enfriamiento más lento favorece la nucleación y el crecimiento de cristales definidos (Spoerer et al., 2021).

Presencia de agentes nucleantes: Algunas sustancias pueden actuar como catalizadores, favoreciendo la formación de cristales y mejorando la uniformidad del proceso (Speranza, Salomone & Pantani, 2023).

- **Relevancia de los sólidos amorfos: Ventajas y limitaciones frente a los sólidos cristalinos.**

Las formas amorfas son, por definición, materiales no cristalinos porque no poseen un orden reticular de largo alcance. Los sólidos amorfos siempre han sido una parte esencial de la investigación farmacéutica. Las sustancias amorfas pueden formarse intencionalmente y no intencionalmente. En algunos casos, según la naturaleza fisicoquímica de la molécula, o

como consecuencia de procesos tecnológicos específicos, un compuesto puede existir exclusivamente en estado amorfo. En otros casos, como consecuencia de tratamientos específicos (congelación y secado por aspersión, fusión y co-fusión, molienda y compresión), la forma cristalina puede convertirse en una forma completamente o parcialmente amorfa. Un material amorfo muestra propiedades físicas y termodinámicas diferentes a las de la correspondiente forma cristalina, con profundas repercusiones en su rendimiento tecnológico (Sánchez G. & Vázquez O., 2016).

Tabla 01. Propiedades que cambien entre el sólido amorfo y el sólido cristalino

Propiedad	Sólido amorfo	Sólido cristalino
Solubilidad	Aumenta	Disminuye
Higroscopicidad	Aumenta	Disminuye
Humectabilidad	Aumenta	Disminuye
Movilidad molecular	Aumenta	Disminuye
Velocidad de disolución	Aumenta	Disminuye
Dureza	Disminuye	Aumenta
Reactividad química	Disminuye	Aumenta
Estabilidad física	Disminuye	Aumenta

Fuente: Asociación Farmacéutica Mexicana, A.C

3. MÉTODOS DE CRISTALIZACIÓN Y CONTROL DE LA CRISTALIZACIÓN

3.1 Métodos de Cristalización

3.1.1 Enfriamiento rápido (quenching).

La cristalización por enfriamiento ocurre cuando la temperatura disminuye, provocando una reducción en la solubilidad de los sólidos disueltos. Durante este proceso, la sobresaturación necesaria para la cristalización se incrementa o se mantiene estable gracias a la reducción de temperatura, que puede ser causada por transferencia de calor al entorno (enfriamiento natural) o hacia superficies diseñadas específicamente en el tanque (enfriamiento controlado). La regulación de esta caída de

temperatura depende del flujo y la temperatura del agua utilizada para enfriar.

La velocidad de enfriamiento está influenciada por el flujo de la solución, la naturaleza y concentración de las impurezas presentes, así como por el diseño y la resistencia estructural del cristizador. Además, la agitación desempeña un papel clave en este tipo de cristalización, ya que facilita la transferencia de calor y elimina las zonas donde el flujo es ineficiente (Rein, 2007).

3.1.2 Métodos mecánicos:

3.1.2.1 Desordenación Mecánica

La amorfización inducida mecánicamente ocurre cuando se aplica energía mecánica continua mediante impactos, cizallamiento o compresión, lo que rompe los enlaces cristalinos y genera una reconfiguración desordenada de los átomos (Zeng et al., 2019). Este método destaca por ser económico y escalable, además de no requerir temperaturas extremas, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones en la producción de aleaciones amorfas y precursores para vidrios ópticos y electrónicos (Ma, 2003).

Sin embargo, este proceso tiene algunas limitaciones, como la posible introducción de impurezas debido al desgaste del equipo y la necesidad de tiempos prolongados en materiales especialmente resistentes. A pesar de ello, sigue siendo una herramienta valiosa en la síntesis de sólidos amorfos, especialmente en materiales que requieren un control preciso de sus propiedades estructurales.

3.2 Métodos de Control de Cristalización

3.2.1 Aditivos y modificadores:

3.2.1.1 Uso de polímeros y agentes nucleantes.

Los polímeros son ampliamente utilizados como estabilizadores en la síntesis de sólidos amorfos, ya que limitan el movimiento de los átomos y reducen la tendencia de los materiales a cristalizar (Sahoo et al., 2020). Este efecto estabilizador resulta especialmente útil en métodos como el sol-gel, donde los polímeros como la polivinilpirrolidona (PVP) desempeñan un papel crucial en el control de la estructura del material, promoviendo la formación de fases amorfas (Shi et al., 2022).

Por otro lado, los agentes nucleantes son herramientas efectivas para controlar el tamaño y la distribución de los núcleos cristalinos. Estos agentes pueden inducir una cristalización dirigida o, en

algunos casos, evitarla por completo, lo que permite obtener una estructura más homogénea (Frank & Matzger, 2018). Ejemplos de agentes nucleantes incluyen sales metálicas y nanopartículas, que se emplean frecuentemente para ajustar las propiedades finales del material en función de sus aplicaciones específicas (Sun et al., 2012).

3.2.1.2 Efecto de dopantes y estabilizadores químicos.

Los dopantes son elementos químicos que se incorporan a la estructura de un material con el fin de modificar su red cristalina, dificultando la formación de una fase cristalina ordenada (Cho et al., 2011). Al añadir dopantes como boro o fósforo en materiales como los vidrios, se evita la cristalización, lo que permite mantener una estructura amorfa estable (Oh et al., 2012). Esta técnica es especialmente útil para obtener materiales con propiedades específicas, como la transparencia o la durabilidad, que son deseables en diversas aplicaciones tecnológicas (Fu et al., 2024).

Por otro lado, los estabilizadores químicos son compuestos que actúan introduciendo especies químicas en el sistema, lo que reduce la energía libre del material y estabiliza la fase amorfa (Zhou et al., 2021). Estos estabilizadores permiten mantener la estructura desordenada de los sólidos amorfos a temperaturas más altas o en condiciones de ambiente más exigentes (Sun et al., 2012). Un ejemplo de estabilizadores químicos son los compuestos orgánicos empleados en la síntesis de aerogeles, que proporcionan una mayor resistencia térmica y química al material (Kim et al., 2012).

3.2.2 Técnicas avanzadas:

3.2.2.1 Campos eléctricos y magnéticos.

Los campos eléctricos facilitan el alineamiento de moléculas o partículas en un material, lo que afecta tanto la nucleación como el crecimiento de cristales (Kohary & Wright, 2011). Al aplicar un campo eléctrico, se puede controlar la orientación y disposición de las partículas, lo que permite una cristalización más controlada o, en algunos casos, evitarla (Tang et al., 2005). Un ejemplo de este fenómeno es la cristalización controlada en líquidos iónicos cuando se les somete a un campo eléctrico, lo que permite manejar la transición de fase de manera más precisa (Uda et al., 2014).

Por otro lado, los campos magnéticos pueden modificar las propiedades energéticas de los materiales, promoviendo la formación de fases

amorfos en sistemas específicos (Wang et al., 2004). Estos campos afectan la disposición de los átomos y las partículas magnéticas, impidiendo el ordenamiento cristalino y favoreciendo una estructura amorfa (Kesler et al., 2019). Un ejemplo de esto es el control de estructuras amorfas en materiales magnéticos blandos, donde el campo magnético interviene para mantener una configuración desordenada, optimizando así sus propiedades magnéticas (Challa et al., 2014).

3.2.2.2 Uso de microreactores y técnicas de deposición.

Los microreactores permiten un control preciso de las condiciones de reacción, como temperatura, presión y flujo, lo que facilita la reducción de la formación de fases cristalinas (Singh et al., 2010). Al mantener estas variables constantes y controladas, los microreactores crean un entorno ideal para la síntesis de materiales amorfos, como en la producción de nanopartículas amorfas mediante sistemas de flujo continuo (Chang et al., 2008). Esta precisión es crucial para obtener materiales con propiedades bien definidas y evitar la cristalización no deseada (Doddapaneni et al., 2022).

Por otro lado, las técnicas de deposición, como la Deposición Química de Vapor (CVD) y la Deposición Física de Vapor (PVD), son métodos avanzados utilizados para generar materiales amorfos (Nazabal & Němec, 2019). Al controlar la velocidad de deposición y la temperatura del sustrato, se pueden producir películas delgadas amorfas con una estructura controlada (Cabarcas, 2012). Estos métodos son especialmente útiles en la fabricación de dispositivos electrónicos, donde las propiedades ópticas y eléctricas de los materiales amorfos son esenciales para el rendimiento de los componentes (Jaiswal et al., 2023).

4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

- Métodos analíticos usados para evaluar el proceso de cristalización:
 - Difracción de Rayos X (XRD).
 - Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM).
 - Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).
 - Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR).

Tabla 02. Técnicas para caracterización de forma sólidas de un compuesto

Propiedades evaluadas	Técnica	Útil para	Tiempo de análisis promedio	Tamaño promedio de la muestra	Destrucción	Tipo de sólido que caracteriza
Estructurales	Difracción de Rayos X (DRX) de polvos	Caracterizar una forma sólida y el contenido de forma cristalina en una mezcla de polvos. Identificar cambio en los patrones de los solvatos.	3 - 8 minutos	10 - 30 mg	No	Polimorfos y amorfos Mezcla de polimorfos y amorfos Solvatos
	Difracción de Rayos X de monocristal	Evaluar el grado de cristalinidad, los defectos del cristal y la geometría de cristal	1 - 2 días	Un solo cristal	Si	Polimorfos y solvatos
	SAXS	Para detectar picos de difracción de largo alcance y pueden proporcionar la distinción entre una fase cristalina líquida de una y dos dimensiones	Variable	Variable	Variable	Polimorfos
	Espectroscopía (IR, NIR, ssRMN, Raman)	Caracterización cuali-cuantitativa de formas sólidas Para diferenciar estructura electrónica y dinámica de los sólidos. Tales estructuras determinan las propiedades básicas electrónicas, ópticas, pero también mecánicas de los materiales. IR es útil para la detección de polimorfismo a nivel molecular. NIR ha sido empleado para la caracterización de diferentes formas sólidas en a granel y/0 nivel de producto de dosificación. RMN: Integridad química de las muestras.	10 - 60 minutos	2 - 30 mg	**	Polimorfos, solvatos, isomorfos, amorfos, mezclas de polimorfos
Dimensionales	Microscopía	Caracterizar el tamaño del cristal, hábito cristalino, estructura superficial, así como fracturas cristalinas. Caracterizar índices de refracción, birrefringencia y dispersión del color. La microscopía de fuerza atómica se ha utilizado para estudiar los mecanismos de crecimiento de los cristales.	5 mg	10 - 60 minutos	No	Polimorfos, solvatos, mezclas de polimorfos, amorfos
	Microscopía de luz polarizada (PLM)	Para discriminar entre una fase amorfa y una fase cristalina líquida	Variable	Variable	No	Polimorfos, solvatos, mezclas de polimorfos, amorfos Más ampliamente usada para caracterizar cristales líquidos
	Micrometría	Caracterizar la distribución del tamaño de partícula y la morfología de la superficie, la porosidad, la forma de las partículas, la densidad y la energía superficial	10 mg - 30 gramos Depende de los equipos empleados	**	No	Polimorfos, solvatos, mezclas de polimorfos, amorfos

Fuente: Asociación Farmacéutica Mexicana, A.C

5. CONCLUSIONES

El proceso de la cristalización es importante para la formación de materiales de estado sólidos, de tal manera determinando sus propiedades físicas y químicas. Por consiguiente en la síntesis de sólidos amorfos, es de vital importancia controlar o prevenir que no se de la cristalización para lograr el aprovechamiento de sus características únicas, como mayor solubilidad, estabilidad térmica y propiedades ópticas mejoradas.

Después de un extenso análisis, se han revisado los principios básicos de la cristalización, donde se incluye sus mecanismos de nucleación y crecimiento, así como ciertos factores que influyen en este fenómeno. Se ha resaltado la relevancia de los sólidos amorfos en diversas industrias, como lo son la industria farmacéutica y la electrónica, donde el control sobre la cristalización puede mejorar significativamente la eficacia y el desempeño de los materiales.

Se ha explorado diversos métodos de cristalización y estrategias para su control, como el enfriamiento rápido, la desordenación mecánica, el uso de aditivos y estabilizadores, así como técnicas avanzadas que emplean campos magnéticos, microreactores y deposición de películas delgadas. Estas estrategias permiten regular la estructura de los materiales y optimizar sus propiedades para aplicaciones específicas.

Además, se han presentado las principales técnicas de caracterización, como la difracción de rayos X, la microscopía electrónica y la espectroscopía infrarroja, que proporcionan herramientas esenciales para analizar y monitorear la estructura de los sólidos obtenidos.

Se llegó a la determinación del control de la cristalización es un campo de estudio crucial en la ciencia de materiales, con implicaciones directas en la optimización de propiedades físico-químicas y en el desarrollo de tecnologías innovadoras. La aplicación de metodologías adecuadas para evitar la cristalización no deseada o inducir estructuras amorfas controladas permitirá avanzar en la creación de nuevos materiales con aplicaciones en sectores clave de la industria moderna.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala.

REFERENCIAS

Dhungana, D. S., Bonaventura, E., Martella, C., Grazianetti, C., & Molle, A. (2023). Solid phase crystallization of amorphous silicon at the two-dimensional limit. *Nanoscale Advances*, 5(3), 668-674. <https://doi.org/10.1039/D2NA00546H>

Harada, K., Sugimoto, T., Kato, F., Watanabe, K., & Matsumoto, Y. (2020). Thickness dependent homogeneous crystallization of ultrathin amorphous solid water films. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(3), 1963-1973. <https://doi.org/10.1039/C9CP05981D>

Jia, X., Liu, Z., Shi, Q., & Zhang, C. (2021). Recent advances in the application of characterization techniques for studying physical stability of amorphous pharmaceutical solids. *Crystals*, 11(12), 1440. <https://doi.org/10.3390/cryst11121440>

Lan, H., Wang, J., Cheng, L., Yu, D., Wang, H., & Guo, L. (2024). The synthesis and application of crystalline-amorphous hybrid materials. *Chemical Society Reviews*, 53(1), 684-713. <https://doi.org/10.1039/D3CS00860F>

Liu, Z., Shi, Q., & Zhang, C. (2021). Advances in stability studies of amorphous pharmaceuticals. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 110(3), 765-778. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.10.015>

Sánchez-González, E. G., Vázquez-Olvera, J. I., Marroquín-Segura, R., Contreras, C. E., & Hernández-Abad, V. J. (2016). Importancia de la investigación acerca del estado sólido durante las etapas iniciales del desarrollo de medicamentos. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 47(3), 7-28.

Ma, E. (2003). *Amorphization in mechanically driven material systems*. Scripta Materialia, 49, 941-946.

Zeng, Y., Alzate-Vargas, L., Li, C., Graves, R. G., Brum, J., Strachan, A., & Koslowski, M. (2019). *Mechanically induced amorphization of small molecule organic crystals*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 27.

Frank, D. S., & Matzger, A. (2018). *Probing the interplay between amorphous solid dispersion stability and polymer functionality*. *Molecular Pharmaceutics*, 15(7), 2714-2720.

Sahoo, A., Suryanarayanan, R., & Siegel, R. (2020). *Stabilization of amorphous drugs by polymers: The role of overlap concentration (C)**. *Molecular Pharmaceutics*.

Shi, Q., Chen, H., Wang, Y., Wang, R., Xu, J., & Zhang, C. (2022). *Amorphous solid dispersions: Role of the polymer and its importance in physical stability and in vitro performance*. *Pharmaceutics*, 14.

Sun, Y., Zhu, L., Wu, T., Cai, T., Gunn, E., & Yu, L. (2012). *Stability of amorphous pharmaceutical solids: Crystal growth mechanisms and effect of polymer additives*. *The AAPS Journal*, 14, 380-388.

Cho, E., Han, S., Kim, D., Horii, H., & Nam, H. (2011). *Ab initio study on influence of dopants on crystalline and amorphous Ge₂Sb₂Te₅*. *Journal of Applied Physics*, 109, 043705.

Oh, Y., Noh, H., & Chang, K. (2012). *First-principles study of the segregation of boron dopants near the interface between crystalline Si and amorphous SiO₂*. *Physica B: Condensed Matter*, 407, 2989-2992.

Fu, L., Yu, W., Wang, B., & Deng, Y. (2024). *Redistribution of dopants between amorphous and crystalline phases in ZrO₂-SiO₂ nanoceramics*. *Journal of the American Ceramic Society*.

Zhou, Y., Hao, W., Zhao, X., Zhou, J., Yu, H., Lin, B., Liu, Z., Pennycook, S., Li, S., & Fan, H. (2021). *Electronegativity-induced charge balancing to boost stability and activity of amorphous electrocatalysts*. *Advanced Materials*, 34.

Sun, Y., Zhu, L., Wu, T., Cai, T., Gunn, E., & Yu, L. (2012). *Stability of amorphous pharmaceutical solids: Crystal growth mechanisms and effect of polymer additives*. *The AAPS Journal*, 14, 380-388.

Kim, S., Park, J.-S., & Chang, K. (2012). *Stability and segregation of B and P dopants in*

Si/SiO₂ core-shell nanowires. *Nano Letters*, 12(10), 5068-5073.

Challa, P., Sprunt, S., Jákli, A., & Gleeson, J. (2014). *Magnetic-field-induced suppression of the amorphous blue phase*. *Physical Review E*, 89(1), 010501.

Kesler, M., Jensen, B., Zhou, L., Palasyuk, O., Kim, T.-H., Kramer, M., Nlebedim, I., Rios, O., & McGuire, M. (2019). *Effects of high magnetic fields on phase transformations in amorphous Nd₂Fe₁₄B*. *Magnetochemistry*.

Kohary, K., & Wright, C. (2011). *Electric field induced crystallization in phase-change materials for memory applications*. *Applied Physics Letters*, 98, 223102.

Tang, J., Li, S., Mao, X., & Du, Y. (2005). *Effect of electric field on the crystallization process of amorphous Fe₈₆Zr₇B₆Cu₁ alloy*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 729-732.

Uda, S., Koizumi, H., Nozawa, J., & Fujiwara, K. (2014). *Crystal growth under external electric fields*. *Journal of Applied Physics*, 1618, 261-264.

Wang, X.-D., Qi, M., & Yi, S. (2004). *Crystallization behavior of bulk amorphous alloy Zr₆₂Al₈Ni₁₃Cu₁₇ under high magnetic field*. *Scripta Materialia*, 51, 1047-1050.

Cabarrocas, P. (2012). *Deposition techniques and processes involved in the growth of amorphous and microcrystalline silicon thin films*. Springer.

Chang, C.-H., Paul, B., Remcho, V. T., Atre, S., & Hutchison, J. (2008). *Synthesis and post-processing of nanomaterials using microreaction technology*. *Journal of Nanoparticle Research*, 10, 965-980.

Doddapaneni, V. K., Dhas, J. A., Chang, A., Choi, C.-H., Han, S.-Y., Paul, B., & Chang, C.-H. (2022). *Transformation, reaction and organization of functional nanostructures using solution-based microreactor-assisted nanomaterial deposition for solar photovoltaics*. *MRS Energy & Sustainability*, 9, 407-442.

Jaiswal, S., Fathi-hafshejani, P., Yakupoglu, B., Boebinger, M., Azam, N., Unocic, R., Hamilton, M. C., & Mahjouri-Samani, M. (2023). *Wafer-scale synthesis of 2D materials by an amorphous phase-mediated crystallization approach*. ACS Applied Materials & Interfaces.

Nazabal, V., & Němec, P. (2019). *Amorphous thin film deposition*. Springer Handbook of Glass.

Singh, A. D., Malek, C., & Kulkarni, S. (2010). *Development in microreactor technology for nanoparticle synthesis*. International Journal of Nanoscience, 9, 93-112.

Du, A., Liu, K., Yang, L., & Gu, Z. (2019). Comparison of crystallization behavior of Trans-1,4-polyisoprene under different crystallization temperature, pressure and tension. *Journal of Polymer Research*, 26. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1830-5>

Huang, D., Zhu, Z., Wang, Q., Qin, B., Dai, L., Jiang, F., Liu, W., & Qian, H. (2020). Prediction model, experimental optimization, and verification for yield of high-pressure crystallization: A case study of citric acid. *Separation Science and Technology*, 55, 135-143. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1561717>

Navrátilová, J., Gajzlerová, L., Kovár, L., & Čermák, R. (2020). Long-chain branched polypropylene: Crystallization under high pressure and polymorphic composition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09931-1>

Speranza, V., Salomone, R., & Pantani, R. (2023). Effects of pressure and cooling rates on crystallization behavior and morphology of isotactic polypropylene. *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst13060922>

Spoerer, Y., Boldt, R., Androsch, R., & Kuehnert, I. (2021). Pressure- and temperature-dependent crystallization kinetics of isotactic polypropylene under process relevant conditions. *Crystals*. <https://doi.org/10.3390/cryst11091138>