فهرست مطالب

صفحه

فصل اول
آشنایی با ماده بلوری

۱-۱ بلور چیست؟ ۲

۱-۲ ویژگی‌های عمومی مواد جامد ۳

۱-۳ رده‌بندی مواد جامد ۵

۱-٤ ویژگی‌های ظاهری و درونی بلورها ۷

۱-۵ ابزارهای تجربی شناخت بلورها ۸

فصل دوم
ساختار هندسی بلور

۲-۱ تعریف بلور ۱۳

۲-۲ شبکه براوه و پایه بلوری ۱٤

۲-۳ بردارهای انتقال و یاخته‌های واحد ۱۷

۲-٤ سیستم‌های بلوری ۲۰

۲-۵ پیامد هندسی نظم بلوری – تقارن ۲۳

۲-٦ تقارن‌های نقطه‌ای ۲۵

۲-٦-۱ تقارن چرخشی (دوران) ۲٦

۲-٦-۲ تقارن انعکاسی (بازتاب) ۲۸

۲-٦-۳ تقارن برگردان ۲۹

۲-۷ ترکیب تقارن‌های نقطه‌ای در دو بعد ۳۰

۲-۸ ترکیب تقارن‌ها در سه بعد ۳۲

۲-۹ تاثیر پایه بلوری بر تقارن نقطه‌ای بلور ۳۲

۲-۱۰ تقارن در سیستم‌های بلوری ۳۳

۲-۱۱ دسته صفحه‌های بلوری و اندیس‌های میلر ۳۵

پرسش‌های فصل دوم ٤٠

فصل سوم

پیوندهای بلوری

٣-١ عدد هم‌آرایی ٤٤
٣-٢ چگالی بسته‌بندی ٤٧
٣-٣ آرایش بلوری ٤٩
٣-٤ انواع پیوند بلوری ٤٩
٣-٥ بلورهای فلزی ٥٦
٣-٦ بلورهای غیرفلزی ٦٢
٣-٦-١ بلورهای یونی ٦٢
٣-٦-٢ بلورهای کووالانی ٦٧
٣-٦-٣ بلورهای مولکولی ٧١
پرسش‌های فصل سوم ٧٤

فصل چهارم

پراش از بلور

٤-١ پراکندگی الاستیک پرتوهای ایکس از ماده بلوری ٧٦
٤-٢ نگرش براگ ٧٧
٤-٣ نگرش لاوه ٨٠
٤-٤ شبکه وارون ٨٣
٤-٥ مرزها و مناطق بریلوئن ٨٧
٤-٦ روش ترسیم اوالد ٩٢
٤-٧ روش‌های تجربی پراش پرتوهای ایکس ٩٣
٤-٨ پراش پرتوهای مادی ٩٩
پرسش‌های فصل چهارم ١٠١

فصل پنجم
جنبه‌های مکانیکی رفتار بلورها

۵-۱ برهم‌کنش اتم‌ها در ماده بلوری ۱۰٤
۵-۲ انرژی بستگی بلورهای یونی ۱۰۹
۵-۳ انرژی بستگی بلورهای مولکولی ۱۱۵
۵-٤ معادله پاشندگی در محیط‌های بلوری ۱۱۹
۵-٤-۱ معادله پاشندگی بلور خطی با با پایه تک‌اتمی ۱۲۰
۵-٤-۲ معادله پاشندگی بلور خطی با با پایه دو اتمی ۱۲٦
۵-۵ پراش نوترونی ۱۳۳
۵-٦ نمودار پاشندگی برای مدهای عرضی و طولی ۱۳۸
۵-۷ شرایط مرزی ۱۳۹
پرسش‌های فصل پنجم ۱٤۱

فصل ششم
جنبه‌های حرارتی رفتار بلورها

٦-۱ ظرفیت گرمایی ویژه ۱٤۳
٦-۱-۱ تئوری جنبشی گازها (مدل درود) ۱٤۵
٦-۱-۲ مدل نوسانگر هماهنگ کلاسیک ۱٤۷
٦-۱-۳ مدل نوسانگر هماهنگ کوانتیزه (مدل انیشتین) ۱٤۹
٦-۱-٤ مدل دبای ۱۵۵
٦-۲ چگالی مدها ۱٦۲
٦-۳ ظرفیت گرمایی ویژه بلورهای رسانا ۱٦٤
٦-٤ فونون ۱٦۵
٦-۵ انرژی نقطه صفر ۱٦۸
٦-٦ رسانش گرمایی در بلور ۱٦۹

٦-٧ پیامد برهم‌کنش‌های ناهماهنگ ۱۷۲
پرسش‌های فصل ششم ۱۷۵

واژه‌نامه ۱۷۷
ثابت‌های فیزیکی و تبدیل واحدها ۱۸۲
منابع ۱۸۳
نمایه ۱۸٤

فصل اول

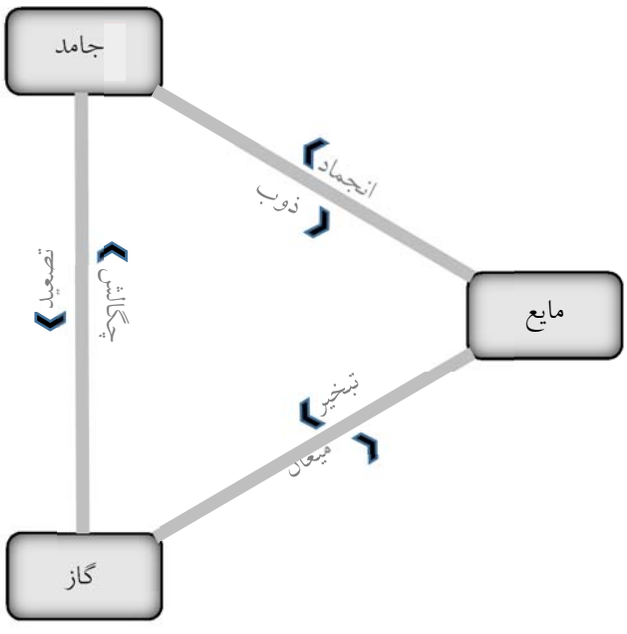
آشنایی با ماده بلوری

جهانی که پیرامون ما را فرا گرفته‌است، از توزیع ناهمگن و ناهمگونی از ماده تشکیل شده‌است. این گستره وسیعِ انواع ماده را به دو دسته **ماده اتمی** و پلاسما[1] طبقه‌بندی می‌کنیم.

ماده اتمی، همان نوع آشنای ماده است که در زندگی روزمره با آن سر و کار داریم و مشتمل است بر سه حالت جامد، مایع و گاز. رفتار فیزیکی ماده اتمی، ارتباط تنگاتنگی با حالت آن دارد و به نوبه خود، تابع شرایط محیطی و درونی ماده است. با تغییر شرایط، ممکن است حالت ماده نیز تغییر کند و گذار فاز صورت گیرد. در ماده اتمی، نیروی پیوندی عمدتا ماهیت الکترومغناطیسی دارد. شکل (۱-۱) گذارهای فاز در ماده اتمی را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

ماده اتمی در بسیاری از زمینه‌های علمی و مهندسی مانند فیزیک اتمی، فیزیک حالت جامد و نانوتکنولوژی مورد بررسی قرار می‌گیرد و معمولا برای توصیف دقیق آن از مکانیک کوانتمی غیر نسبیتی و فیزیک آماری کوانتمی استفاده می‌شود. حالت ماده اتمی، ویژگی‌های فیزیکی آن را مشخص می‌کند. در فرآیند تبدیل ماده از یک حالت به حالت دیگر، پدیده‌های جالبی رخ می‌دهند که البته در اینجا بدان نمی‌پردازیم.

[1] محیط گازی حاوی تعداد زیادی ذره باردار آزاد را ماده پلاسمایی می‌نامیم. این ماده در درون ستاره‌ها و اتمسفر پیرامون آنها، فضای بین ستارگان، بادهای خورشیدی، شفق قطبی، جرقه رعد و برق، لامپ‌های نئون، تلویزیون‌های پلاسما و بسیاری جاهای دیگر وجود دارد و در واقع، فراوان‌ترین شکل ماده در کل گیتی است. هم‌چنین می‌توان پلاسما را به صورت آزمایشگاهی در فرآیند تخلیه الکتریکی و یا از طریق گرم کردن محیط گازی یا قرار دادن آن در معرض تابش الکترومغناطیسی، ایجاد نمود. در فیزیک حالت جامد، دریای الکترونی در شبکه‌های فلزی را به‌عنوان **پلاسمای الکترونی** در نظر می‌گیریم.



شکل ۱–۱ حالت‌های ماده اتمی و گذارهای فازی که بین آنها رخ می‌دهد.

۱–۱ بلور چیست؟

موضوع بحث فیزیک حالت جامد، شناخت مواد کریستالی (یا بلورین)، بررسی ویژگی‌های آنها و تبیین مدل‌های نسبتا ساده فیزیکی برای توجیه رفتار آنهاست. در این حوزه علمی، بلور به ماده جامدی اطلاق می‌شود که دارای نظم دوره‌ای نامحدود در چینش اتم‌ها (مولکول‌ها یا یون‌ها) باشد.

در ادامه، دوباره به این تعریف خواهیم پرداخت، اما فعلا بر نکته بنیادی آن تمرکز می‌کنیم: بلور، نوع خاصی از حالت جامد ماده است. بنا بر این، لزومی ندارد که هر جسم جامدی، در زمره مواد بلوری باشد. در این مورد می‌توان کُک[۱]، چوب و کاغذ را به‌عنوان نمونه نام برد. از سوی دیگر، برخی از مواد اگرچه جامد به‌نظر می‌آیند، اما واقعا جامد نیستند. مثلا شیشه با وجود ظاهر جامدش، در حقیقت مایعی با ویسکوزیته بسیار بالاست[۲] و طبیعتا مانند هر مایع دیگری می‌تواند جاری شود، به‌طوری که اگر شیشه پنجره روبرویمان تا صدها سال بعد

[۱] جامدی آمورف (بی‌شکل، *amorphous*) متشکل از اتم‌های کربن.

[۲] ویسکوزیته شیشه به حدی زیاد است که در بسیاری از متون علمی، آن را جامد آمورف در نظر می‌گیرند.

سالم باقی می‌ماند و ما نیز شانس دیدن آن را داشتیم، مشاهده می‌کردیم که بخش بالایی و پایینی آن، ضخامت یکسان اولیه را ندارد.

مواد پلیمری و سرامیکی نیز به دلیل ساختار بسیار پیچیده‌ای که دارند، خارج از حوزه فیزیک حالت جامد و به‌طور جداگانه مطالعه می‌شوند. مواد پلیمری، متشکل از زنجیره‌های بلند مولکولی با پایه آلی هستند که اغلب ساختار نابلوری دارند، اما برخی از آنها متشکل از مخلوطی از نواحی بلوری و نابلوری هستند. سرامیک‌ها نیز حاوی عناصر فلزی و غیرفلزی هستند و می‌توانند بلوری، نابلوری و یا آمیخته‌ای از هر دو باشند.

۱–۲ ویژگی‌های عمومی مواد جامد

از آنجا که ماده بلوری، رده خاصی از حالت جامد ماده است، مرور کوتاهی بر ویژگی‌های عمومی ماده جامد (در مقایسه با مایع و گاز) می‌تواند مفید باشد. ویژگی‌های کلی مواد جامد به قرار زیر است:

- ماده جامد، متشکل از اتم‌هایی نسبتا نزدیک به یکدیگر[۱] است که در جایگاه‌های کاملا مشخصی قرار دارند، به‌طوری که هر اتم از فضای بسیار محدودی برای تحرک برخوردار است.
- به دلیل کم بودن فاصله نسبی اتم‌ها، چگالی جرمی مواد جامد بزرگ است.
- هر ماده جامد، دارای شکل معین خاص خود است. روشن است که تغییر شکل یک ماده مستلزم شکستن برخی از پیوندهای بین اتمی و به عبارت دیگر، جابجا شدن برخی از اتم‌ها از جایگاه اولیه به جایگاه‌های خالی در دسترس است. بنا بر این، شکل مشخص یک جامد را می‌توان ناشی از تعداد نسبتا کم جایگاه‌های خالی (در ماده) و هم‌چنین قوی بودن نیروهای پیوندی دانست.
- مواد جامد، سخت و تراکم‌ناپذیرند و در دمای معین، حجم و دانسیته ثابتی دارند. تغییر حجم جامد نیازمند تغییر فاصله نسبی اتم‌هاست.
- جامدها به دلیل جرم حجمی بزرگ و وجود نیروهای پیوندی قوی در درون ماده، یک‌پارچگی و انسجام خود را مدت زیادی حفظ می‌کنند.

[۱] در مقایسه با فاصله اتم‌ها در حالت مایع و گاز.

– انتقال انرژی حرارتی کافی به جامدها غالبا سبب ذوب آنها می‌شود و در موارد معدودی به تصعید می‌انجامد.

برای درک مبانی رفتار مواد جامد توجه می‌کنیم که وضعیت فیزیکی یک ماده، تابع شرایط محیطی و درونی آن است. مکان تعادلی هر اتم در درون جامد بر اساس برآیند نیروهای جاذبه و دافعه‌ای که (از سوی دیگر اتم‌ها) بر آن وارد می‌شود، مشخص می‌گردد[۱]. با بررسی این نیروها می‌توانیم درک بهتری از رفتار مواد جامد داشته‌باشیم.

نیروهای جاذبه و دافعه در ماده جامد ممکن است با یکدیگر به تعادل برسند و یا یکی، بر دیگری برتری یابد. در حالت تعادل، حجم ماده تغییر نمی‌کند. چنانچه نیروهای دافعه بر جاذبه برتری یابند، ماده افزایش حجم می‌یابد و این روند ادامه می‌یابد تا حالت تعادل برقرار شود[۲]. از سوی دیگر، هرگاه برآیند نیروهای پیوندی بر نیروهای دافعه غلبه کند، ماده در خود فرو رفته و حجم آن کاهش می‌یابد تا آنجا که سرانجام، وضعیت موازنه نیروهای جاذبه و دافعه برقرار شود.

نیروهای پیوندی در انواع جامدها از عوامل مختلفی سرچشمه می‌گیرند. این امر در مورد نیروهای دافعه نیز صدق می‌کند، اما یک عامل عمده در ایجاد نیروهای دافعه میان اجزای مواد جامد، اصل طرد پاولی است. بنا بر اصل طرد پاولی، تابع موج مجموعه‌ای از فرمیون‌ها[۳]، حتما پادمتقارن است. در مورد خاص برای دو فرمیون می‌توان اصل طرد پاولی را به این صورت بیان نمود: هیچ دو فرمیونی، اعداد کوانتمی کاملا یکسانی ندارند. مثلا دو الکترون اتمی نمی‌توانند در حالت یکسانی قرار گیرند[٤]. با نزدیک شدن دو اتم به یکدیگر (در فواصل بسیار کوتاه) ابر الکترونی آنها به‌تدریج هم‌پوشانی می‌کند و ممکن است که برخی از الکترون‌ها در موقعیت مکانی بسیار نزدیک به هم قرار گیرند. اما مطابق اصل طرد پاولی، الکترون‌ها نمی‌توانند ترازهای انرژی را که قبلا پر شده‌است، اشغال کنند و در نتیجه، به سوی مدارهای اشغال نشده‌ای رانده می‌شوند که دارای انرژی بالاتر هستند. به این

[۱] به‌طور کلی، در این بحث لازم است که هم نیروهای خارجی و هم نیروهای درونی ماده را در نظر گیریم. اما در اینجا بر نیروهای درونی تمرکز داریم.

[۲] البته بر حسب شرایط موجود ممکن است روند افزایش حجم تا آنجا ادامه یابد که ماده از هم بپاشد.

[۳] فرمیون‌ها ذراتی با اسپین نیم‌فرد هستند.

[٤] یک الکترون اتمی با چهار عدد کوانتمی اصلی n، مداری l، مغناطیسی m_l و اسپینی m_s مشخص می‌شود.

ترتیب، قرار گرفتن اتم‌ها در موقعیت‌های مکانی خیلی نزدیک به هم، انرژی کل ماده جامد را افزایش داده و یک سهم دافعه بسیار بزرگ در برهم‌کنش اتم‌ها ایجاد می‌کند. البته برهم‌کنش دافعه، برد بسیار کوتاهی دارد و به محض این که هم‌پوشانی ابر الکترونی اتم‌های مجاور برطرف شود، تاثیر خود را از دست می‌دهد.

مبانی بروز انواع نیروهای پیوندی بین اجزای ماده بلوری در فصل سوم شرح داده خواهد شد. در بخش بعد، توضیحاتی درباره رده‌بندی مواد جامد ارائه می‌شود.

۱–۳ رده‌بندی مواد جامد

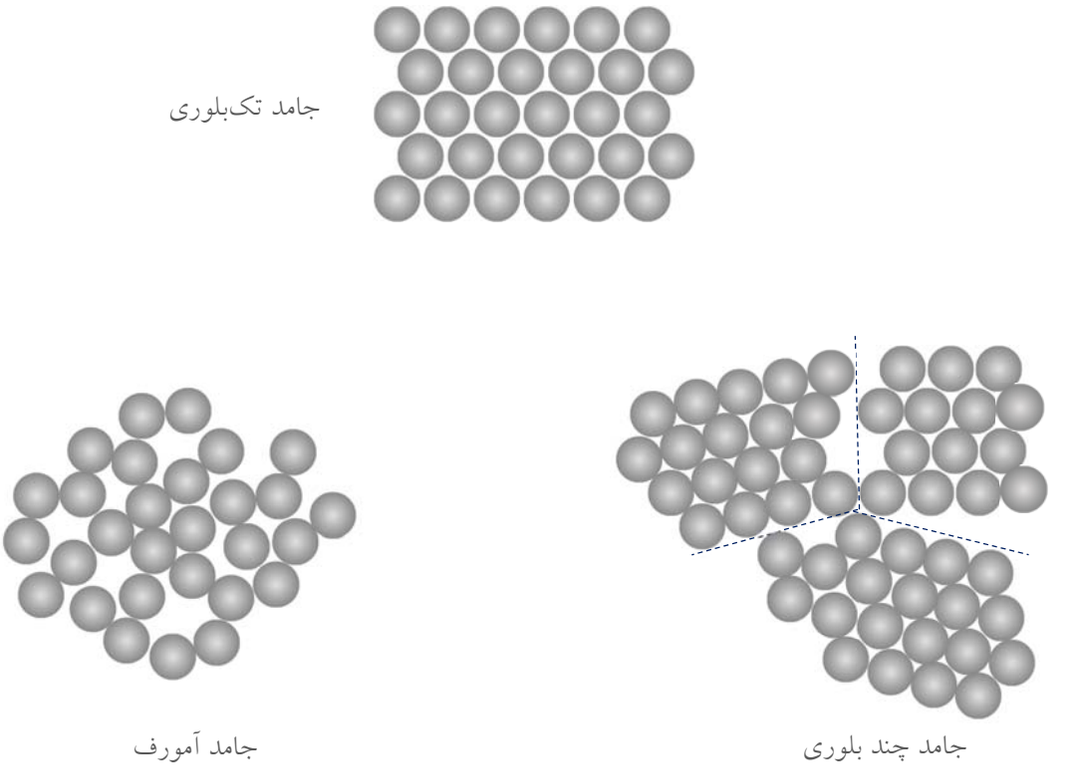
پیشتر دریافتیم که همه مواد جامد به فرم بلوری نیستند. مواد جامد بر مبنای نحوه چینش اتم‌ها به دو دسته کلی **جامدهای بلوری** و **جامدهای آمورف** تقسیم می‌شوند. انواع جامدهای بلوری نیز به ماده **تک‌بلوری** و **چند بلوری** رده‌بندی می‌شوند. شکل (۱–۲) نحوه چینش اتم‌ها را در هر یک از این رده‌ها نشان می‌دهد.

جامدهای آمورف موادی هستند که چینش اتمی در آنها فاقد هر گونه ساختار پریودی است و به عبارت دیگر، هیچ نظم بلند بردی در مکان اتم‌ها مشاهده نمی‌شود. کُک، کائوچو و پلاستیک در زمره جامدهای آمورف هستند.

در یک ماده تک‌بلوری، اتم‌ها به‌طور کاملا منظم در کنار یکدیگر آرایش یافته‌اند و نظم دوره‌ای بلند برد در کل ماده و تا سرحد مرزهای آن به‌طور پیوسته برقرار است. در فصل آینده خواهیم دید که ابعاد فیزیکی تک‌بلور می‌بایست بزرگتر از یک حد معین باشد.

ماده چند بلوری، حد واسط جامد تک‌بلوری و آمورف است. ماده چند بلوری محیطی شامل شمار زیادی تک‌بلور کوچک[1] با ابعاد متفاوت است که در جهات مختلف در کنار هم قرار گرفته‌اند. سطح مرزی جدا کننده دو تک‌بلور همسایه را **مرز دانه‌ای** می‌نامیم. نظم دوره‌ای در هر یک از تک‌بلورها برقرار است، اما جهت‌گیری چینش اتم‌ها در هر بلورک متفاوت از بقیه است. به بیان دیگر، ساختار دوره‌ای ماده چندبلوری در مرز دانه‌ها شکسته شده‌است. ابعاد بلورک‌های موجود در مواد چند بلوری ممکن است از مرتبه نانومتر یا حتی میلیمتر باشد.

[1] یا بلورک.



شکل ۱–۲ نحوه چینش اتم‌ها در انواع مواد جامد.

خط‌چین‌های رسم‌شده در شکل جامد چند بلوری، مرزهای دانه‌ای را نشان می‌دهند.

بنا بر ملاحظات ترمودینامیکی، رشد ماده تک‌بلوری با ابعاد بزرگ، به‌طور طبیعی ندرتا رخ می‌دهد و در آزمایشگاه نیز تنها در شرایط خاص و کاملا کنترل‌شده میسر است. در مقابل، دسترسی به شرایط رشد مواد چند بلوری بسیار ساده‌تر است. به همین دلیل برخلاف تک‌بلورها، فراوانی مواد چندبلوری طبیعی، خیلی زیاد است. اغلب بلورهایی که از معادن استخراج می‌شوند، به فرم چندبلوری هستند. البته تک‌بلورهای بزرگ که تراکم ناکاملی در آنها قابل ملاحظه است، نیز به وفور در معادن یافت می‌شوند. اما تک‌بلورهای بزرگ و فاقد ناکاملی[1]، بسیار نادرند. کمیاب بودن الماس ناب و دیگر سنگ‌های قیمتی معدنی، گواهی بر این مدعاست.

[1] بروز هر نوع بی‌نظمی در ماده تک‌بلوری را **ناکاملی بلوری** می‌نامند.