



دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشد تک بلورهای سه تایی  $ZnS_xSe_{1-x}$  به روش CVT

و مطالعه خواص آنها

توسط:

مریم عالی دائی

استاد راهنما:

مجید جعفر تفرشی

آبان ۱۳۸۸

## رشد تک بلورهای سه تایی $ZnS_xSe_{1-x}$ به روش CVT

### و مطالعه خواص آنها

#### چکیده

این پایان نامه به رشد تک بلورهای سه تایی  $ZnS_xSe_{1-x}$  به روش CVT و بررسی خواص آنها می پردازد. فصل اول پایان نامه به معرفی بلورها به عنوان گروهی از جامدات، اهمیت، کاربرد و روش های متداول در رشد آنها می پردازد. فصل دوم به بررسی اهمیت بلورهای گروه II-VI جدول تناوبی و معرفی روش انتقال بخار شیمیایی (CVT) اختصاص یافته است. در فصل سوم محاسبات تئوریک برای تعیین شرایط بهینه رشد قبل از شروع آزمایشات آورده شده است. در فصل چهارم تجهیزات مورد نیاز در رشد به روش CVT و آنالیزها معرفی شده است. در فصل پنجم، گزارش فعالیت های محدود انجام پذیرفته توسط سایر محققین در رشد این بلورهای سه تایی مرور و نتایج انجام آزمایشات نیز آورده شده است. در فصل آخر این پایان نامه، نتایج آنالیزهای متعدد انجام پذیرفته بر روی بلورهای رشد یافته، نظیر طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، سختی سنجی ویکرز، طیف سنجی عبور نوری UV-Vis، مطالعه میکرو ساختاری SEM و آنالیز تعیین کیفیت ساختاری آورده شده است.

#### واژه های کلیدی

انتقال شیمیایی فاز بخار (CVT)، تک بلور، دمای بهینه رشد، ریزساختاری

## فهرست مندرجات

۱۲	۱ مقدمه‌ای بر رشد بلور
۱۲	۱-۱ معرفی جامدات بلورین .....
۱۵	۲-۱ کاربرد تک‌بلورها .....
۱۵	۳-۱ تاریخچه رشد بلور .....
۱۷	۴-۱ روش‌های رشد بلور .....
۱۸	۵-۱ فرایند رشد بلور از فاز جامد .....
۱۸	۶-۱ رشد از مذاب .....
۱۸	۱-۶-۱ روش ورنوئیل .....
۱۹	۲-۶-۱ روش چکرالسکی .....
۲۰	۳-۶-۱ روش بریجمن .....
۲۱	۴-۶-۱ روش منطقه شناور .....

۲۱	۷-۱ رشد از محلول
۲۲	۱-۷-۱ رشد از محلول در دمای پایین
۲۲	۲-۷-۱ رشد از محلول در دمای بالا (روش فلاکس)
۲۳	۸-۱ فرایند رشد بلور از فاز بخار
۲۴	۱-۸-۱ روش تصعید
۲۵	۲-۸-۱ فرایند نشست بخار شیمیایی (CVD)
۲۵	۳-۸-۱ فرایند انتقال بخار شیمیایی (CVT)
۲۶	۹-۱ نرخ تولید سالانه بلورها با استفاده از روش‌های مذکور
۲۷	۱۰-۱ رانشستی
۲۷	۱-۱۰-۱ رانشستی فاز مایع
۲۸	۲-۱۰-۱ رانشستی فاز بخار
۲۸	۱-۲-۱۰-۱ رانشستی فاز بخار متداول (VPE)
۲۹	۲-۲-۱۰-۱ رانشستی دیواره داغ (HWE)
۳۰	۳-۲-۱۰-۱ رانشستی نشست بخار شیمیایی فلز-آلی (MOCVD)
۳۰	۴-۲-۱۰-۱ رانشستی پرتو ملکولی (MBE)
۳۱	<b>۲ فرایند انتقال بخار شیمیایی (CVT)</b>
۳۱	۱-۲ مقدمه

۲-۲ اهمیت و کاربردهای تک بلورهای گروه‌های II-VI جدول تناوبی ..... ۳۲

۳-۲ ویژگی‌های نیمه‌رساناهای مرکب گروه (ZnSe - ZnS) II-VI ..... ۳۴

۴-۲ شیمی فیزیک واکنش‌های انتقال شیمیایی ..... ۳۷

۵-۲ عوامل موثر بر روی فرایند انتقال بخار شیمیایی ..... ۳۹

۶-۲ عوامل موثر در انتخاب عامل انتقال ..... ۴۰

۷-۲ مزایا و محدودیت‌های روش CVT ..... ۴۱

### ۳ محاسبات ترمودینامیکی شرایط بهینه رشد به روش CVT ۴۳

۱-۳ لزوم بهینه نمودن شرایط رشد در روش CVT ..... ۴۳

۲-۳ محاسبه ضریب اشباع در سیستم‌های ساده CVT ..... ۴۴

۳-۳ محاسبات ترمودینامیکی تعیین دمای بهینه رشد سیستم  $ZnS_xSe_{1-x}$  ..... ۴۶

۵۲	۴ تجهیزات رشد بلور به روش CVT و آنالیز آن‌ها
۵۲	۴-۱ کوره.....
۵۴	۴-۲ محفظه رشد.....
۵۵	۴-۳ سیستم خلاء.....
۵۸	۴-۴ ترموکوپل و پروفایل دمایی کوره.....
۵۹	۴-۵ ترازوی دیجیتال.....
۵۹	۴-۶ آنالیز کمی و کیفی بلورها.....
۵۹	۴-۶-۱ آنالیز پراش پرتو X (XRD).....
۶۱	۴-۶-۲ روش سنجش میکروسختی ویکرز.....
۶۲	۴-۶-۳ طیف سنجی عبور نوری (UV-Vis).....
۶۳	۴-۶-۴ آنالیز ریزساختاری.....
۶۴	۴-۶-۵ آنالیز کیفیت ساختاری بلور.....
۶۵	۴-۶-۶ مورفولوژی سطحی بلورها.....
۶۶	۴-۶-۷ رفتار رشدی بلورها.....
۶۷	۴-۶-۸ رشد مارپیچ‌ها.....
۶۸	۴-۶-۹ رشد تپه‌ها.....
۶۹	۴-۶-۱۰ ماکروپله، ماکرولایه و چین خوردگی‌ها.....

## ۵ رشد تک بلورهای $ZnS_xSe_{1-x}$ به روش CVT

۷۱

۱-۵ مروری بر کارهای قبل ..... ۷۱

۲-۵ انجام آزمایشات ..... ۷۲

۳-۵ نتایج آزمایشات انجام شده ..... ۷۵

## ۶ آنالیز کمی و کیفی بلورهای $ZnS_xSe_{1-x}$ رشد یافته

۸۰

۱-۶ نتایج آنالیز پراش پرتو X بلورهای رشد یافته ..... ۸۰

۲-۶ نتایج آنالیز میکروسختی ویکرز بلورهای رشد یافته ..... ۸۲

۳-۶ نتایج طیفسنجی عبوردهی نوری (UV-vis) بلورهای رشد یافته ..... ۸۳

۴-۶ نتایج آنالیز ریزساختاری بلورهای رشد یافته ..... ۸۴

۵-۶ نتایج آنالیز کیفیت ساختاری بلورهای رشد یافته ..... ۸۹

## فهرست اشکال

- ۱a-۱ طرح‌واره‌ای از طرز قرارگرفتن اتم‌ها در یک ماده تک‌بلور..... ۱۲
- ۱b-۱ تصویری از یک ماده تک‌بلور..... ۱۳
- ۲a-۱ طرح‌واره‌ای از طرز قرار گرفتن اتم‌ها در یک ماده چندبلور..... ۱۳
- ۲b-۱ تصویری از یک ماده چندبلور..... ۱۳
- ۳a-۱ طرح‌واره‌ای از طرز قرارگرفتن اتم‌ها در ماده آمورف..... ۱۴
- ۳b-۱ تصویری از یک ماده آمورف..... ۱۴
- ۴-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد بلور به روش ورنوئیل..... ۱۹
- ۵-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد بلور به روش چکراسکی..... ۲۰



- ۶-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد بلور به روش بریجمن..... ۲۰
- ۷-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد بلور به روش منطقه شناور..... ۲۱
- ۸-۱ طرح‌واره‌ای از رشد بلور از محلول در دمای پایین..... ۲۲
- ۹-۱ سیستم‌های رشد بلور از فاز بخار..... ۲۴
- ۱۰-۱ طرح‌واره‌ای از محفظه رشد بلور به روش تصعید..... ۲۵
- جدول ۱-۱ نرخ تخمینی تولید سالانه جهانی بلورها..... ۲۶
- ۱۱-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد بلور به روش LPE..... ۲۸
- ۱۲-۱ نمایی از واکنشگر رونشینی فاز بخار VPE..... ۲۹
- ۱۳-۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه رشد MBE..... ۳۰
- ۱-۲ کاربرد ترکیبات گروه‌های II-VI جدول تناوبی..... ۳۳
- جدول ۱-۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ترکیبات دوتایی ZnS و ZnSe گروه‌های  
II-IV جدول تناوبی..... ۳۴
- ۲-۲ ساختارهای زینک بلند و ورتزایت..... ۳۶

- ۳-۲ تک بلورهای  $ZnS_xSe_{1-x}$  از  $x=0.3$  تا  $x=0.8$  با اختلاف 0.1..... ۳۶
- ۴-۲ طرح‌واره‌ای از تیوب انتقال بخار شیمیایی  $(T_1 < T_2)$ ..... ۳۷
- ۱-۳ نمودار تغییرات  $\Delta\alpha$  برای بلور  $ZnS_xSe_{1-x}$  بر حسب دما به ازاء  $x = 0.6$ ..... ۵۰
- ۲-۳ نمودار تغییرات دمای بهینه رشد بلور  $ZnS_xSe_{1-x}$  بر حسب تغییرات غلظت عامل انتقال به ازاء ترکیبات مختلف عناصر  $(x)$ ..... ۵۱
- ۱-۴ کوره مدل TZF 3216 استفاده شده جهت فرایند رشد به روش CVT..... ۵۳
- ۲-۴ آمپول تهیه شده از لوله کوارتز..... ۵۴
- ۳-۴ کنترل هسته گذاری در رشد از بخار..... ۵۵
- ۴-۴ طرح‌واره‌ای از یک دستگاه خلاء (HINDHIVC)..... ۵۷
- ۵-۴ تصویر سیستم خلاء استفاده شده برای بستن آمپول‌ها در خلاء..... ۵۷
- ۶-۴ نمونه‌ای از پروفایل دمایی کوره سه‌ناحیه‌ای، همراه با طرح‌واره‌ای از نحوه قرارگیری تیوب کوارتز در داخل مافل کوره..... ۵۸
- ۷-۴ ترازوی دیجیتال Sartorius دارای دقت 0.1 mg..... ۵۹

- ۴-۸ طرح واره‌ای از آنالیز پراش اشعه X..... ۶۰
- ۴-۹ طرح واره‌ای از آزمایش ویکرز آزمایش ویکرز..... ۶۱
- ۴-۱۰ دو نوع متفاوت از ماکرومورفولوژی رشد..... ۶۷
- ۴-۱۱ رشد تپه‌ها در نقطه حضور نابجایی‌ها..... ۶۹
- ۵-۱ شستشوی لوله کوارتز با اسید کرومیک..... ۷۳
- ۵-۲ نمونه‌ای از آمپول حاوی مواد اولیه که در حضور خلاء بسته شده است..... ۷۳
- ۵-۳ نمونه‌ای از بلورهای ZnSe رشد یافته در داخل تیوب CVT..... ۷۶
- ۵-۴ بلور ZnSe رشد یافته در دمای بهینه  $777^{\circ}C$ ..... ۷۶
- ۵-۵ بلور ZnSe رشد یافته در دمای غیر بهینه  $877^{\circ}C$ ..... ۷۷
- ۵-۶ تک بلور  $ZnS_{0.3}Se_{0.6}$  رشد یافته در دمای بهینه  $822^{\circ}C$ ..... ۷۷
- ۵-۷ تک بلور  $ZnS_{0.3}Se_{0.6}$  رشد یافته در دمای بهینه  $822^{\circ}C$ ..... ۷۸

- ۸-۵ تک بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  رشد یافته در دمای بهینه  $892^{\circ}C$  محدود به وجه کوچک (۱۱۱) و وجه‌های بزرگ (۰۱۰) و (۱۰۰).....۷۸
- ۹-۵ تک بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  رشد یافته در دمای بهینه  $892^{\circ}C$  بدون سنتز مجدد مواد اولیه.....۷۹
- ۱۰-۵ تک بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  رشد یافته در دمای بهینه  $892^{\circ}C$ .....۷۹
- ۱-۶ طیف پراش اشعه X بلور  $ZnS_{0.3}Se_{0.4}$ .....۸۱
- ۲-۶ طیف پراش اشعه X بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$ .....۸۱
- ۳-۶ نتایج مربوط به میکروسختی سنجی ویکرز بر روی سطح (۱۱۱).....۸۲
- ۴-۶ طیف جذب نوری تک بلور  $ZnSe$ .....۸۳
- ۵-۶ طیف جذب نوری تک بلور  $ZnS_{0.3}Se_{0.6}$ .....۸۴
- ۶-۶ تشکیل لایه‌های منظم روی سطح بلور  $ZnSe$ .....۸۶
- ۷-۶ تشکیل لایه‌های نامنظم روی سطح بلور  $ZnSe$ .....۸۶
- ۸-۶ رشد سریع لایه‌ها روی سطح بلور  $ZnSe$ .....۸۷

- ۶-۹ پله های با دسته های متفاوت روی سطح بلور ZnSe ..... ۸۷
- ۶-۱۰ تشکیل پله ها و پیچ و تاب ها بر روی سطح بلورهای ZnSe ..... ۸۸
- ۶-۱۱ ساختار پله ای روی سطح بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  ..... ۸۸
- ۶-۱۲ تپه های ناشی از اچینگ حرارتی روی سطح (۱۱۱) بلور ZnSe ..... ۹۰
- ۶-۱۳ تپه های ناشی از اچینگ حرارتی روی سطح (۱۱۱) بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  ..... ۹۰
- ۶-۱۴ حفره های ناشی از اچینگ شیمیایی روی سطح (۱۱۱) بلور  $ZnS_{0.6}Se_{0.4}$  ..... ۹۱
- جدول (۶-۱) نتایج حاصل از رشد و آنالیز میکروساختاری بلورهای  $ZnS_xSe_{1-x}$  ..... ۹۲

## فصل ۱

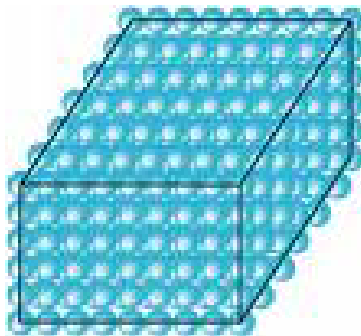
### مقدمه‌ای بر رشد بلور

#### ۱-۱ معرفی جامدات بلورین

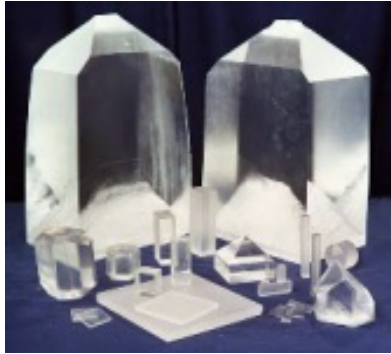
جامدات از لحاظ ساختاری به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱) تک‌بلورها: در این مواد، یک الگوی سه‌بعدی مرتب شده در تمام بلور گسترش یافته است. اشکال

(۱ a,b-۱)

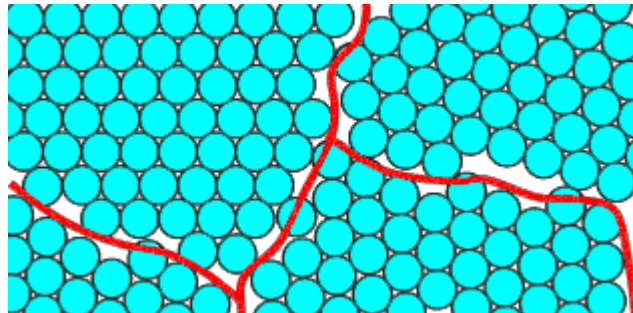


شکل ۱a-۱ طرح‌واره‌ای از طرز قرار گرفتن اتم‌ها در یک ماده تک بلور



شکل ۱b-۱ تصویری از ماده تک بلور

(۲) چندبلورها: در این ماده، الگوی سه‌بعدی مرتب شده در تمام بلور گسترش نیافته بلکه به وسیله‌ی صفحاتی قطع می‌شود، که به هر یک از این قسمت‌های منظم جدا شده یک دانه می‌گویند (شکل‌های ۱a,b-۲).

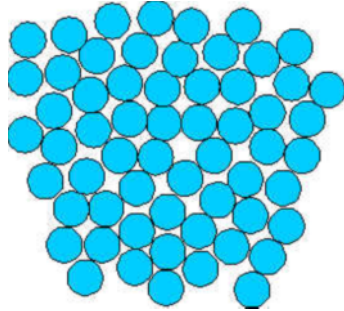


شکل ۲a-۱ طرح‌واره‌ای از طرز قرار گرفتن اتم‌ها در یک ماده چندبلور



شکل ۲b-۱ تصویری از یک ماده چند بلور

۳) جامدات بی شکل (آمورف): در این ماده اندازه دانه‌ها خیلی کوچک و در حد چند اتم بوده و این ماده اصولاً فاقد ساختار تناوبی است (شکل‌های ۱-۳a,b).



شکل ۱-۳a طرح‌واره‌ای از طرز قرار گرفتن اتم‌ها در ماده آمورف



شکل ۱-۳b تصویری از یک ماده آمورف

به مواد جامدی که اجزای سازنده‌ی آنها (ملکول، اتم یا یون‌ها) در سه جهت فضایی به صورت منظم کنار هم قرار گرفته باشند، کریستال یا بلور می‌گویند. این اتم‌ها به فاصله‌ای خیلی بزرگتر از سایز اتم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۱-۱). واژه‌ی کریستال ریشه‌ی یونانی داشته و به معنی منجمد شده در اثر سرما است. یونانی‌ها کریستال را برای اشاره به در کوهی به کار می‌بردند. آن‌ها اعتقاد داشتند که اگر آب مدتی در دماهای بسیار پایین نگه‌داشته شود، به حالتی در می‌آید که در دماهای بالا پایدار است.

وزن بلورهای طبیعی بزرگ در حدود چند کیلوگرم و بلورهای مصنوعی تا ده ها کیلوگرم بالغ می‌شود. مواد در طبیعت بیشتر تمایل دارند که به صورت بلوری باشند زیرا مواد بلورین دارای آنترپی کمتری هستند. هنگام



جهت گیری اتم‌ها در بلورها نقایص مختلفی ایجاد می‌شود که این امر خود باعث پیدایش خواص مختلفی در بلورها می‌شود. خواص ذاتی به دلیل وجود نقص‌هایی نظیر رسانندگی ذاتی در بلور خالص ایجاد می‌شوند از قبیل خواص فرومغناطیس و پیزوالکتریک. خواص غیر ذاتی به دلیل کم یا زیاد شدن ناخالصی‌ها ایجاد می‌شوند [۱].

## ۱-۲ کاربرد تک‌بلورها

تک‌بلورها به جهت کاربرد فراوان‌شان در صنعت از اهمیت خاصی برخوردار هستند. آن‌ها در ساخت دستگاه‌های ارتباط از راه دور و ابزارهای محاسباتی خیلی دقیق به کار برده می‌شوند. تک‌بلورها در ساخت قطعات الکترونیک و الکترواپتیک و همچنین در فناوری‌های نظامی و اقتصادی نظیر مخابرات با امواج نور، فیبر نوری، لیزرها، آشکارسازها و سلول‌های خورشیدی نیز کاربرد فراوان دارند. در رشد یک بلور باید کنترل زیادی بر موارد زیر داشته باشیم:

- (۱) نواقص
- (۲) غلظت ناخالصی‌ها
- (۳) غلظت اتم‌های خارجی که مخصوصاً برای ایجاد ویژگی خاص به عنوان آلاینده اضافه می‌شوند.
- (۴) مورفولوژی بلور

## ۱-۳ تاریخچه رشد بلور

هانس شیل<sup>۱</sup> از پیشگامان فناوری رشد بلور بوده که در مقاله به چاپ رسیده خود در ژورنال مخصوص رشد بلور، سیر تاریخی این فناوری را به شرح ذیل آورده است [۲]:

مفاهیم بنیادین فناوری رشد بلور از آزمایش‌های اولیه بلورسازی در قرن ۱۸ و ۱۹، توسعه علم ترمودینامیک در اواخر قرن نوزدهم به وسیله‌ی گیبس<sup>۲</sup>، آرنوس<sup>۳</sup>، وانت هف<sup>۴</sup> و نیز توسعه نظریه‌های رشد و هسته‌سازی و نقش

---

<sup>۱</sup> Hanss Scheel

<sup>۲</sup> Gibss

<sup>۳</sup> Arrhenius

<sup>۴</sup> Vant Hoff

پدیده انتقال در قرن ۲۰ ام سرچشمه می‌گیرد. تا آن زمان مفاهیمی نظیر زیرتبریدی<sup>۱</sup> و گرمای بلورسازی، به‌وسیله‌ی فارنهایت<sup>۲</sup> (۱۷۲۴) و نیز لوئیتز<sup>۳</sup> (۱۷۹۵) شناخته شده بودند. نواحی نیمه‌پایدار یعنی محدوده وجود محلول‌های زیرتبریدی به‌وسیله‌ی استوالد<sup>۴</sup> در خلال سال‌های ۱۸۹۷-۱۸۹۳ و نیز مایرز<sup>۵</sup> در سال ۱۹۰۶ اندازه‌گیری و تعریف شد. این در حالی بود که تاثیر اصطکاک بر روی پهنای این ناحیه استوالد-مایرز به‌وسیله‌ی یانگ در خلال سال‌های ۱۹۱۳-۱۹۱۱ توضیح داده شده بود. اثر هم‌زدن، بر روی ناحیه نیمه‌پایدار در بلورسازی انبوه نمک، شکر و بعضی از مواد شیمیایی، دارای اهمیت است اما تاکنون این اثر از جنبه نظری درک نشده است. تامان<sup>۶</sup> در سال ۱۹۲۵ آهنگ‌های تشکیل هسته و بلورسازی را عمدتاً در شیشه‌ها مطالعه نمود و ولمر<sup>۷</sup> و وبر<sup>۸</sup> تئوری‌های تشکیل هسته را پایه‌گذاری نمودند. گزارش سطوح بلوری با پله‌ها و پیچ و تاب‌ها به‌وسیله کاسل<sup>۹</sup> (۱۹۲۷) باعث شد استرانسکی<sup>۱۰</sup> و کایشیو<sup>۱۱</sup> (۱۹۳۴) کار جدا سازی واحدهای بلوری را به شکل پله‌های تکرار شونده به عنوان پایه ای برای اولین نظریه‌های رشد بلور تعریف نمایند. با علم به شکل‌گیری سطوح بلوری به عنوان تابعی از آنتروپی گذار (جکسون ۱۹۵۸) و نیز تابعی از چگالی پیوندها در ساختمان بلور (هارتمن<sup>۱۲</sup> و پردوک<sup>۱۳</sup> ۱۹۵۵) نقش نابجایی‌های پیچشی به عنوان منابعی از پله‌های پیوسته در شکل‌گیری تپه‌ماندها (فرانک<sup>۱۴</sup> ۱۹۴۹) و تئوری عمودی (برتون<sup>۱۵</sup>، کابرا<sup>۱۶</sup> و فرانک) و بعضی دیگر از پدیده‌های رشد بلور توضیح داده شد. در رشد بلور از محیط سیال (مذاب، محلول، فاز گاز) پدیده‌های انتقال حرارت و جرم نقش قابل توجهی را بازی می‌کنند؛ همانگونه که در ابتدا به‌وسیله‌ی رایلی<sup>۱۷</sup> (۱۷۴۵) و فرانک هیم<sup>۱۸</sup> (۱۸۳۵) مشاهده شد. نظریه لایه مرزی نفوذی که به‌وسیله‌ی نویس<sup>۱۹</sup> و وایت نی<sup>۲۰</sup> (۱۸۹۷) تعریف شد در معادله آهنگ رشد نرنست<sup>۲۱</sup> (۱۹۰۴) مورد استفاده قرار گرفت و به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی نمودارهای غلظت پیرامون بلورهای در حال رشد، به‌وسیله‌ی برگ<sup>۲۲</sup> (۱۹۸۳) و دیگران مورد تأیید قرار گرفت. ولف<sup>۲۳</sup> (۱۸۸۶)، کروگر<sup>۲۴</sup> و فینکی<sup>۲۵</sup> (۱۹۱۰) و جانسن<sup>۲۶</sup> (۱۹۱۵) (برای سیستم‌های باز دارای همزن) نشان دادند که همرفت واداشته برای رشد محدود به فرایند نفوذ مفید است و این در حالی است که هم‌زدن یکنواخت در ظروف در بسته به‌وسیله روش چرخش بوته شتاب‌دار، قابل دستیابی است (شیل ۱۹۷۱). رشد بلورهای عاری از نقص به روش مذاب با توجه به اصول زیرتبریدی نفوذی ایوانسف<sup>۲۷</sup> (۱۹۵۱) و زیرتبریدی ساختاری تیلر<sup>۲۸</sup> - جکسون - روتر<sup>۲۹</sup> - چامرز<sup>۳۰</sup> (۱۹۵۳) قابل انجام است. در رشد از محلول می‌توان با ایجاد جریان‌های کافی در جهت یا در مقابل سطوح رشد کننده، از شکل‌گیری نقص‌ها (یعنی ناپایداری رشد) جلوگیری نمود.

<sup>1</sup> Undercooling<sup>2</sup> Fahrenheit<sup>3</sup> Lowitz<sup>4</sup> Ostwald<sup>5</sup> Miers<sup>6</sup> Tammann<sup>7</sup> Volmer<sup>8</sup> Weber<sup>9</sup> Kossel<sup>10</sup> Stranski<sup>11</sup> Kaischew<sup>12</sup> Hartman<sup>13</sup> Perdok<sup>14</sup> Frank<sup>15</sup> Burton<sup>16</sup> Cabrea<sup>17</sup> Roulle<sup>18</sup> Frankenheim<sup>19</sup> Noyes<sup>20</sup> Whitney<sup>21</sup> Nernst<sup>22</sup> Berg<sup>23</sup> Wulff<sup>24</sup> Kruger<sup>25</sup> Finke<sup>26</sup> Johnsen<sup>27</sup> Ivantsov<sup>28</sup> Tiller<sup>29</sup> Rutter<sup>30</sup> Chamers

کارلسون<sup>۱</sup> (۱۹۵۳) نظریه‌ای بر مبنای تجربه را ایجاد کرد که این تئوری به‌وسیله‌ی شیل و ال ول<sup>۲</sup> (۱۹۷۲) به‌کار گرفته شد تا بیشترین آهنگ رشد پایدار و برنامه‌ریزی بهینه فوق‌اشباعی، برای به‌دست‌آوردن بلورهای بزرگ عاری از نقص به‌کار برده شود. مسئله جدا شدن، که مربوط به انتقال جرم و حرارت است باعث غیریکنواختی‌های میکروسکوپیکی و ماکروسکوپیکی در بلورهای آلائیده می‌شود. بر اساس ضرایب توزیع موثر به‌دست آمده به‌وسیله برتون (۱۹۵۳) برای رشد از مذاب و نیز به‌وسیله ون ارک<sup>۳</sup> (۱۹۸۲) برای رشد از محلول، شرایط تجربی و تئوری برای رشد بلورهای عاری از نقص به‌وسیله‌ی شیل، سامراور<sup>۴</sup> و ریتز<sup>۵</sup> (۱۹۸۲/۱۹۸۳) برقرار شد.

## ۴-۱ روش‌های رشد بلور

در رشد بلور اولین موضوعی که باید مورد توجه قرار گیرد خواص فیزیکی مواد است. آشنایی با خواص فیزیکی نظیر نقطه ذوب، نقطه جوش، چگالی، ضریب انبساط گرمایی، قابلیت واکنش با سایر مواد، طبیعت الکترونی مواد و نظایر آن در تعیین روش رشد ضروری است. همچنین پارامترهای دیگر نظیر فشار بخار مواد که در دمای محیط دچار تغییر فاز در حالت جامد می‌شوند در انتخاب روش رشد تاثیر گذار هستند. بعضی از بلورها با چندین روش متفاوت رشد قابل تولید هستند که در نتیجه از لحاظ اندازه، شکل و کیفیت متفاوت هستند. بلورهای رشد یافته به‌وسیله‌ی هر روش با توجه به اندازه، خلوص و شکل هندسی‌شان، در ساخت قطعات مخصوصی استفاده می‌شوند.

رشد بلور در سه فاز مختلف صورت می‌گیرد که عبارتند از:

- (۱) فرایند رشد بلور از فاز جامد
- (۲) فرایند رشد بلور از فاز مایع که خود بر دو قسم است:  
الف) رشد از مذاب                      ب) رشد از محلول
- (۳) فرایند رشد بلور از فاز بخار

<sup>۱</sup> Carlson

<sup>۲</sup> Elwell

<sup>۳</sup> Van Erk

<sup>۴</sup> Sommerauer

<sup>۵</sup> Rytz

## ۵-۱ فرایند رشد بلور از فاز جامد

این فرایند رشد بلور، برای بعضی از فلزات که بازپخت تحت کشش در آن‌ها موثر است و در موارد خاصی که بین دمای ذوب و دمای اتاق، تغییر شبکه بلوری رخ می‌دهد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع فرایند نمی‌توان تک بلورهایی با ابعاد بزرگ رشد داد.

## ۶-۱ رشد از مذاب

رشد بلور از فاز مذاب، پرکاربردترین روش در صنعت است. بیشتر بلورهای مهم صنعتی به وسیله‌ی این روش رشد داده می‌شوند. همچنین این روش نسبت به سایر روش‌ها ارزان است. در این روش ابتدا باید ماده اولیه بلور را ذوب نموده و سپس به یکی از روش‌های رایج، انجماد کنترل شده‌ی آن را انجام دهیم. این روش‌ها غالباً بر ایجاد گرادیان دمایی حول نقطه انجماد ماده تشکیل دهنده بلور استوار هستند. این گرادیان دمایی را می‌توان با دور کردن ماده مذاب از ناحیه گرم (بریجمن) و یا دور کردن آن از شعله (ورنوئیل) و یا کشش بلور از درون مذاب (چکرالسکی) و پالایش ناحیه‌ی (ذوب ناحیه‌ی) ایجاد کرد.

### ۱-۶-۱ روش ورنوئیل

در روش گداخت شعله و یا ورنوئیل ابتدا ماده اولیه را به صورت پودر تهیه کرده و با استفاده از ضربه‌های یکنواختی این پودر وارد دستگاه می‌شود. در دستگاه مخلوطی از گاز هیدروژن و اکسیژن با پودر مخلوط شده و باعث ایجاد شعله و ذوب شدن پودر می‌شود. پودر ذوب شده روی یک صفحه در حال دوران قرار گرفته و با سرعت خیلی کم از شعله دور می‌شود و در نتیجه به آهستگی منجمد و تک‌بلور ایجاد می‌شود. در این روش به علت نیاز نداشتن به بوته، آلودگی ناشی از بوته ایجاد نمی‌شود [۳].