

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک کاربردی (حالت جامد)

موضوع:

مطالعه و رشد لایه های چند گانه GaAs/AlGaAs به

روش LPE

اساتید راهنما:

دکتر مهدی اسکویی

دکتر فرزاد تاییدی

اساتید مشاور:

دکتر سید محسن صالح کوتاهی

دکتر داریوش فتحی

نگارش:

برهان ارغوانی نیا

اسفند ماه ۸۱

تقدیم بہ

پدر عزیزم

و

مادر مہربانم

سپاس و قدردانی:

در خلال آماده سازی و انجام این پروژه دوستان گرانقدری بنده را یاری و راهنمایی نمودند که قدردانی از این عزیزان را وظیفه خود می دانم بدیهی است که انجام این پروژه بدون یاری و همکاری ایشان ممکن نبوده است.

از زحمات استاد گرامی جناب آقای دکتر مهدی اسکویی که استاد راهنمای این پروژه بودند و همچنین از استاد عزیزم جناب آقای دکتر سید محسن صالح کوتاهی که مشاوره این پروژه را عهده دار بودند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از جناب آقای دکتر محمد رضا حنطه زاده که در راستای انجام این پروژه امکان استفاده از آزمایشگاه SIMS مرکز تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی را فراهم آوردند تشکر و قدردانی می نمایم.

در پایان از همکاری سرکار خانم آرزو طبسی کارشناس بخش لیزر و مسئول آزمایشگاه LPE و سایر عزیزان مشغول در بخش لیزر نیمه هادی سازمان انرژی اتمی ایران که بنده را در انجام این پروژه یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده:

رشد رونشستی از فاز مایع روشی است که برای ساختن ادوات الکترونیکی و لیزرهای نیمه هادی بطور وسیعی از آن استفاده می شود.

در این پایان نامه ، لایه های نازک GaAs/AlGaAs روی یک زیر لایه n-GaAs با جهت مندی (100) با روش LPE رشد داده شده اند که این لایه های نازک دارای مشخصات زیر هستند:

لایه اول) n-GaAs:Te به ضخامت ۴ تا ۶ میکرون و تراکم آلاینده $n = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

لایه دوم) n-Al_{0.4}Ga_{0.6}As: Sn به ضخامت ۱/۵ تا ۲/۵ میکرون و تراکم آلاینده $n = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

لایه سوم) GaAs به ضخامت تقریبی ۰/۱ میکرون و بدون آلاینده

لایه چهارم) p-Al_{0.4}Ga_{0.6}As:Ge به ضخامت ۱/۵ تا ۲/۵ میکرون و تراکم آلاینده $p = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

لایه پنجم) p-GaAs:Ge به ضخامت ۲ تا ۳ میکرون و تراکم آلاینده $p = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

تهیه شد.

پس از رشد لایه ها ضخامت و یکنواختی لایه گذاری بوسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت همچنین بوسیله دستگاه SIMS عناصر تشکیل دهنده در هر لایه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس اطلاعات بدست آمده از دستگاه SIMS تغییرات Ga, As, Al که عناصر تشکیل دهنده نیمه هادی GaAs, AlGaAs را تشکیل می دهند به دقت اندازه گیری شدند همچنین چگالی ناخالصی های Ge, Sn, Te و تغییرات دانسیته بر حسب عمق نفوذ کاملاً نشان میداد که میزان بهینه هر کدام از ناخالصیها در چه حدودی بایستی باشد.

در فصل اول به بررسی انواع مختلف روشهای رشد لایه های نازک به روش اپی تکسی پرداخته می شود و در فصل دوم به بیان ویژگیها و خصوصیات لایه های چند گانه GaAs/AlGaAs پرداخته شده است. در فصل سوم به بیان مورفولوژی سطح (نقایص بلوری روی سطح) لایه های رشد داده شده به روش LPE می پردازیم. در فصل چهارم کلیه کارهای آزمایشگاهی و تجربی بیان شده است و در نهایت در فصل پنجم به بیان نتایج بدست آمده از تجزیه و تحلیل و آنالیز لایه های رشد داده شده پرداخته ایم.

فصل اول: رشد رونشستی (اپی تکسی)

- ۱-۱-۱- مقدمه ۱
- ۲-۱- رشد رونشستی وانواع آن ۲
- ۳-۱- رشد رونشستی فاز مایع ۳
- ۳-۱-۱- ابر اشباع کردن محلول رشد ۴
- ۳-۱-۱-۱- سرد کردن سرایشی ۵
- ۳-۱-۲- سرد کردن پله ای ۷
- ۳-۱-۳- سرد سازی ابرسرمایش ۹
- ۳-۱-۴- رشد محلول دوفازی ۱۲
- ۳-۱-۲- انتقال محلول به روی زیرلایه ۱۲
- ۳-۳-۱- مزایای روش LPE ۱۶
- ۴-۱- رسوب بخار شیمیایی مواد آلی فلزی (MOCVD) ۱۶
- ۵-۱- اپی تکسی به روش باریکه مولکولی (MBE) ۱۹
- ۶-۱- اپی تکسی فاز بخار (VPE) ۲۱

فصل دوم: ویژگی لایه های چند گانه GaAs / AlGaAs

- ۲-۱- انتخاب نوع لایه ها وضخامت آنها ۲۴
- ۲-۲- انتخاب نوع آلاینده هاتراکم حاملها وخصوصیات آنها ۲۶
- ۲-۳- کنترل خواص الکتریکی و لومینسانس ۲۷
- ۲-۳-۱- اندازه گیری ضریب هال ۲۸
- ۲-۳-۲- اندازه گیری ظرفیت- ولتاژ ۲۸
- ۲-۳-۳- خصوصیات لایه های GaAs/AlGaAs ۲۸
- ۲-۴- دیاگرام فاز ۳۵
- ۲-۴-۱- تکنیکهای اندازه گیری دمای گذار T_L ۳۶
- ۲-۴-۱-۱- آنالیز دیفرانسیل حرارتی ۳۶
- ۲-۴-۱-۲- تکنیک انحلال دانه ۳۷
- ۲-۴-۱-۳- تکنیک مشاهده مستقیم ۳۷
- ۲-۴-۲- نمودار فاز Ga-As ۳۸

- ۴۰ ۵-۲- معادلات مربوط به ضخامت لایه ها
- ۴۱ ۲-۵-۱- حل معادله پخش
- ۴۲ ۲-۵-۱-۱- سرد کردن پله ای
- ۴۲ ۲-۵-۱-۲- سرد کردن سراسیبی
- ۴۴ ۲-۵-۱-۳- ابرسرمایش
- ۴۶ ۲-۶- خواص مواد نیمرسانا برای ساختار GaAs/AlGaAs
- ۴۷ ۲-۶-۱- تطابق شبکه در ساختار های غیر متجانس
- ۴۸ ۲-۶-۲- ثابت شبکه AlGaAs
- ۴۹ ۳-۶-۳- گاف انرژی GaAs/AlGaAs
- ۵۱ ۲-۷- نفوذ ماده حل شده
- ۵۲ ۲-۸- جهات بلوری زیرلایه
- ۵۳ ۲-۹- سایش و چگونگی تعیین جهتندی زیرلایه
- ۵۳ ۲-۹-۱- سایش زیرلایه
- ۵۳ ۲-۹-۲- جهتند نمودن زیرلایه
- ۵۶ ۲-۱۰- محاسبه وزن مواد لازم برای آرایش و اشباع محلولها

فصل سوم: مورفولوژی سطح

- ۶۸ ۳-۱- مقدمه
- ۶۹ ۳-۲- برجستگی های ناشی از نقایص سطح
- ۷۴ ۳-۳- شبیهای پلکانی و امواج
- ۷۶ ۳-۴- خطوط
- ۷۸ ۳-۴-۱- خطوط L و T
- ۸۴ ۳-۴-۲- خطوط هلالی
- ۸۸ ۳-۵- خطوط متقاطع شبکه ای

فصل چهارم: عملیات آزمایشگاهی

- ۹۰ ۴-۱- مراحل آماده سازی ویفرهای زیرلایه ودانه
- ۹۰ ۴-۱-۱- مقدمه

- ۹۱ ۴-۱-۲- سایش
- ۹۲ ۴-۱-۳- عملیات مربوط به صیقل کاری قطعه
- ۹۶ ۴-۲- ساختار اصلی دستگاه LPE
- ۹۸ ۴-۲-۱- سیستم خلا، LPE
- ۹۹ ۴-۲-۲- کوره و سیستم کنترل کننده دما
- ۹۹ ۴-۲-۳- دستگاه خالص کننده هیدروژن
- ۱۰۰ ۴-۲-۴- راکتور و زیر سیستم انتقال مواد و زیرلایه
- ۱۰۱ ۴-۳- بوتله گرافیتی
- ۱۰۱ ۴-۴- تعیین مقدار اکسیژن موجود در هیدروژن با استفاده از دستگاه ایجاد شبنم
- ۱۰۲ ۴-۵- تمیزی تجهیزات و خلوص مواد مصرفی
- ۱۰۲ ۴-۶- اندازه گیری وزن حلال گالیم و مواد اشباع کننده و آلاینده ها
- ۱۰۲ ۴-۶-۱- وزن کردن گالیم
- ۱۰۲ ۴-۶-۲- اندازه گیری وزن مواد اشباع کننده و آلاینده ها
- ۱۰۳ ۴-۷- تنظیم خلاء سیستم
- ۱۰۴ ۴-۸- تمیز کردن بوتله گرافیتی و حرارت دادن آن
- ۱۰۴ ۴-۹- تعیین پروفایل دمایی در طول بوتله گرافیتی
- ۱۰۴ ۴-۱۰- تمیز کردن سیستم LPE، ابزار و وسایل رشد
- ۱۰۴ ۴-۱۱- فرایند مربوط به آماده سازی گالیم
- ۱۰۵ ۴-۱۱-۱- سونش گالیم
- ۱۰۵ ۴-۱۱-۲- انتقال گالیم ها به داخل بوتله گرافیتی
- ۱۰۵ ۴-۱۱-۳- حرارت دهی گالیم در خلاء
- ۱۰۶ ۴-۱۱-۴- حرارت دادن گالیم در فلوی هیدروژن
- ۱۰۷ ۴-۱۲- آماده سازی زیرلایه، دانه و مواد مصرفی برای ورود به محیط رشد
- ۱۰۸ ۴-۱۲-۱- چربی زدایی زیرلایه و دانه
- ۱۰۸ ۴-۱۲-۲- چربی زدایی مواد مصرفی
- ۱۰۹ ۴-۱۲-۳- سونش زیرلایه دانه و مواد دیگر
- ۱۱۰ ۴-۱۳- رشد لایه های چند گانه GaAs/AlGaAs
- ۱۱۰ ۴-۱۳-۱- پیش پخت گالیم ها

- ۱۱۰.....۴-۱۳-۲- انتقال زیرلایه و مواد به داخل بوته گرافیتی.
- ۱۱۱.....۴-۱۳-۳- حرارت دادن مذابهای رشد.....
- ۱۱۱.....۴-۱۳-۴- مرحله رشد لایه های GaAs/AlGaAs.....

فصل پنجم: بررسی و آنالیز لایه ها

- ۱۱۴.....۵-۱- بررسی مورفولوژی لایه های رشد یافته.....
- ۱۱۸.....۵-۲- تعیین ضخامت لایه ها.....
- ۱۱۹.....۵-۲-۱- کیفیت لایه ها.....
- ۱۱۹.....۵-۲-۲- ضخامت لایه ها.....
- ۱۲۱.....۵-۳- طیف سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS).....
- ۱۲۴.....۵-۴- آنالیز لایه های رشد یافته به وسیله SIMS.....

فصل اول : رشد رونشستی (اپی تکسی)

۱-۱- مقدمه

رشد بلور عبارتست از، علم و تکنولوژی کنترل گذارهای فاز که به یک جامد تک بلور منجر می شود [۱]. رشد بلور انواع متعددی دارد که برای مقاصد متفاوتی بکار می روند. یکی از این روشها رشد رونشستی (Epitaxy) است. که یکی از مهمترین و پرکاربردترین روشهای رشد بلور بصورت لایه نازک می باشد این روش، امکان کنترل نمودارهای آرایش^۱ ارائه می دهد بطوریکه طرز کار قطعه و مدار را می توان بهینه کرد [۲]. در این فصل انواع مختلف رشد رونشستی و بطور ویژه رشد رونشستی فاز مایع^۲ را بررسی خواهیم کرد، رشد رونشستی فاز مایع روشی است که در این پایان نامه، برای رشد لایه های چندگانه استفاده شده است. امروزه این تکنیک بطور وسیعی برای رشد دادن لایه های از نیم رساناهای مرکب (III-V)، (II-VI) و ترکیبات آنها مانند GaAs, AlGaAs, GaP, InP, InGaAs, InGaAsP و غیره بکار برده شده است.

انواع زیادی از قطعات اپتوالکترونیک، میکروموج، دیودهای لیزری، دیودهای الکترو لومینسانس، دیودهای نورگسیل با بیشترین راندمان کوانتومی بالا از قبیل Gunn, ImpATT، قطعات حباب مغناطیسی و غیره که بطور موفقیت آمیزی با تهیه ساختارهای بوسیله این روش ساخته شده است [۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷].

1- Dopant

2- Liquid Phase Epitaxy

۲-۱- رشد رونشستی و انواع آن

رشد رونشستی عبارتست از رشد یک لایه تک بلور نازک بر روی یک زیرلایه^۱ تک بلور با ساختار شبکه‌ای مشابه، بطوریکه لایه بلوری در حال رشد ساختار و جهت بلور زیرلایه را حفظ می‌کند [۸] به عبارت دیگر اتمها در لایه در حال رشد از ترتیب اتمهای زیرلایه تبعیت می‌کنند [۹]. جنس لایه‌ای که روی زیرلایه رشد می‌یابد یا از جنس زیرلایه است که در این صورت به آن رشد رونشستی متجانس^۲ گفته می‌شود. مانند وقتی که یک لایه GaAs را روی زیرلایه GaAs بنشانیم. ولی اگر جنس لایه و زیرلایه متفاوت باشد رشد مربوطه، رشد رونشستی غیرمتجانس^۳ نامیده می‌شود. یک مثال مهم در این مورد دیود لیزری با ساختار نامتجانس از لایه‌های GaAs/AlGaAs با طول موج پیوسته در دمای اتاق است. عموماً رشد رونشستی بر اساس شکل‌گیری بلور با کنترل روی انتقال فاز که منجر به تک بلور جامد می‌شود، می‌باشد. رشد رونشستی یک فرآیند دینامیکی است و یک فرآیند تعادلی نمی‌باشد.

رونشستی معادل فارسی کلمه Epitaxy (اپی تکسی) است که این کلمه، یک کلمه یونانی و از دو جزء Epi و Taxy تشکیل شده است. و اولین بار توسط رویر (Royer) بکار برده شد. جزء Epi به معنی روی و جزء Taxy به معنی منظم می‌باشد [۹]. اپی تکسی به صورت رونشستی، روآراستی و یا برآراستی ترجمه شده است.

انواع رشد رونشستی را می‌توان بصورت زیر طبقه‌بندی کرد.

۱- رشد رونشستی فاز مایع (LPE)

۲- رشد رونشستی فاز بخار مواد آلی (MOVPE)^۴ یا رسوب بخار شیمیایی مواد آلی فلزی (MOCVD)^۵

۳- رشد رونشستی باریکه مولکولی (MBE)^۶

-
- 1- Substrate
 - 2- HomoEpitaxy
 - 3- HeteroEpitaxy
 - 4- Metal Organic Vapour Phase Epitaxy
 - 5- Metal Organic chemical Vapour Epitaxy
 - 6- Molecular Beam Epitaxy

۴- رشد رونشستی فاز بخار (VPE)^۱

۵- رشد رونشستی فاز بخار جامد (SPE)^۲

گاهی رشد MBE و MOVPE (MOCVD) را زیرشاخه‌ای از VPE طبقه‌بندی می‌کنند و این طبقه‌بندی وابسته به محیطی است که اتمهای سازنده برای رشد از آن عبور می‌کنند [۹].

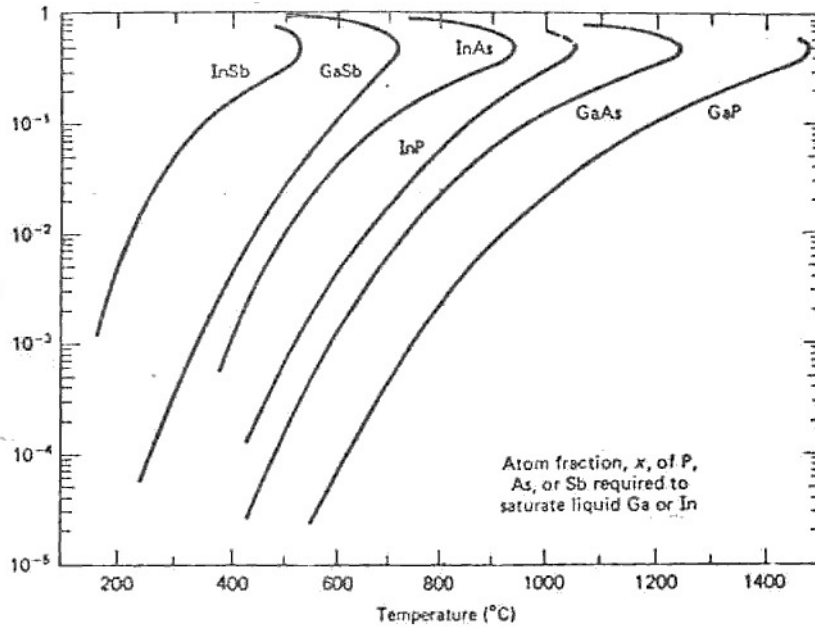
۱-۳- رشد رونشستی فاز مایع

رشد LPE برای نیمرساناهای مرکب بر این اصل استوار است که مخلوط نیمرسانا با یکی از عناصر تشکیل‌دهنده آن در دمایی بسیار پایین‌تر از دمای ذوب نیمرسانا انجام می‌شود.

مثلاً نقطه ذوب GaAs، $1238^{\circ}C$ است در صورتیکه مخلوط Ga, GaAs دارای دمای ذوب بسیار پایین‌تری می‌باشند (حدود $830^{\circ}C$) بنابراین می‌توان زیرلایه GaAs را بدون ذوب شدن در تماس با محلول اشباع Ga+GaAs قرار داد. زیرا نقطه ذوب این مخلوط پایین‌تر از نقطه ذوب GaAs است. با سرد کردن تدریجی سیستم، لایه‌ای از تک بلور GaAs را بر روی زیرلایه رشد داد. با خروج GaAs از محلول و رشد آن روی زیرلایه، محلول از نظر Ga غنی‌تر شده و نقطه ذوب پایین‌تر می‌آید. با سرد کردن بیشتر، GaAs بیشتری از محلول جدا می‌شود و بلور روساخت (Epitaxial) به رشد ادامه می‌دهد. و در نتیجه بسیاری از مشکلات ناشی از آلودگی بلور به ناخالصی که معمولاً هنگام رشد در دمای ذوب بلور بوجود می‌آید، برطرف می‌شود. این روش مخصوصاً برای ترکیبات III-V مفید است [۸ و ۱۲].

به این ترتیب باید محلولی را فراهم کرد که در دمای رشد با توجه به منحنی فاز، اشباع از آرسنیک باشد، برای این منظور براساس دیاگرام فاز وزن معینی از GaAs جامد را به مذاب گالیوم اضافه می‌کنند [۲].

برای مثال با توجه به شکل (۱-۱)، یک محلول Ga بعلاوه As در دمای T برابر $810^{\circ}C$ با ۲/۵ درصد اتمی As اشباع شده و با پایین آوردن دما، GaAs بر روی زیرلایه ته‌نشین می‌شود [۱۳].



شکل ۱-۱- منحنی های حلالیت^۱ برای آرسنایدها، فسفایدها و آنتیمونایدها در یک مذاب Ga یا In [۱۳]

به طور کلی رشد LPE شامل مراحل زیر است [۱۱]:

۱- ابراشباع^۲ کردن محلول

۲- انتقال محلول به روی زیرلایه

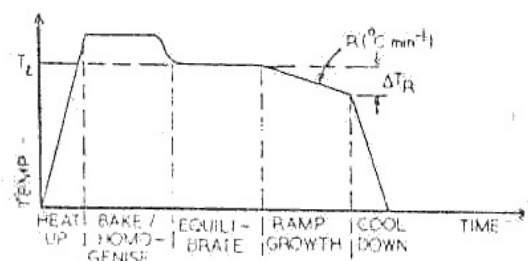
۳- جداکردن محلول از زیرلایه بعد از زمان رشد (t)

۱-۳-۱- ابراشباع کردن محلول رشد

اساس رشد LPE ساختن محلول رشد، فوق اشباع است. برای اشباع کردن محلول، بطور معمول از چهار روش سردکردن استفاده می شود که هر کدام آهنگهای رشد و مورفولوژی در سطح لایه را سبب می شوند این چهار روش را بصورت زیر بررسی می کنیم.

۱-۱-۳-۱- سرد کردن سرایشی^{۲۱}

در این روش ابتدا زیرلایه و محلول را با هم تماس می دهیم، سپس دما را از خط مایع T_1 با آهنگ ثابتی تا دمای $T_i - \Delta T_R$ کاهش می دهیم و این کاهش دما در حالی صورت می گیرد که محلول با زیرلایه در تماس است. در دمایی که رشد آغاز می شود، یعنی دمای اشباع، محلول اشباع است نکته مهم این است که قبل از تماس محلول و زیرلایه هیچگونه کاهش دمایی وجود ندارد و ضمن رشد لایه نیز، دما ثابت نیست (شکل ۲-۱) [۱۴].



شکل (۲-۱) نمودار تغییرات دما- زمان در رشد LPE برای سردسازی سرایشی

نمودار تغییرات ضخامت لایه بر حسب زمان رشد:

تغییرات ضخامت لایه (d) با زمان (t) برای GaAs که در دمای (T) برابر 800°C با آهنگ سرمایش

$$R = 0.6 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

با این روش رشد داده شده است. در شکل (۳-۱) ملاحظه می شود [۳ و ۱۵].

در این روش ضخامت^۳ با توان $\frac{3}{2}$ زمان (t) متناسب است و داده‌های تجربی هم با این تناسب سازگاری دارند.

مزایای این روش [۱۴، ۱۵]:

۱- روش سردسازی سرایشی نتیجه خیلی مطلوبی برای رشد لایه‌ها به ارمغان ندارد.

۲- یکنواختی ضخامت لایه‌ها و توپوگرافی سطح رضایت بخش نیست.

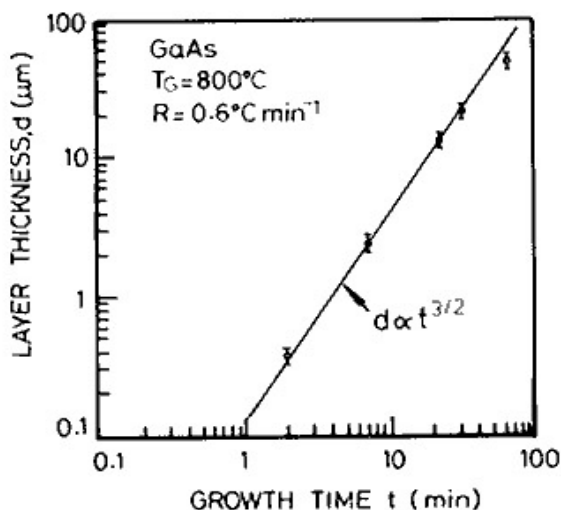
1- Ramp cooling

۲- سرد سازی سرایشی، سرد سازی تعادلی هم نامیده میشود (Equilibrium cooling).

۳- معادله ضخامت بر حسب زمان برای روشهای فوق در فصل دوم اثبات شده است.

۳- تجربه نشان داده است که نوسانات دما در شرایط رشد و چگونگی لایه‌ها موثر است.

۴- این روش برای لایه‌هایی که ضخامت آنها بین ۵ تا ۵۰ میکرون است و یا ضخامت دقیقی برای لایه‌ها مطرح نمی‌باشد کاربرد وسیعی دارد.



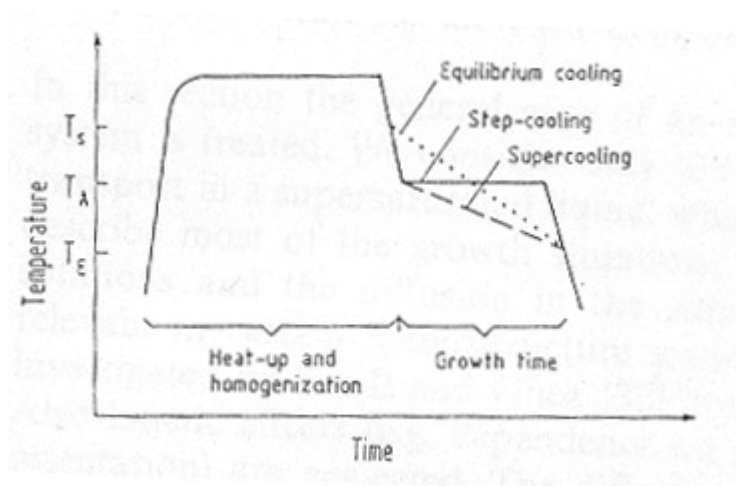
شکل (۳-۱) ضخامت لایه بر حسب زمان رشد برای سردسازی سراسی

روش سردسازی سراسی را با توجه به شکل (۳-۱) نیز می‌توان اینگونه بیان کرد:

شکل (۳-۱) روشهای مختلف سردسازی را نشان می‌دهد که در آن دمای اشباع، T_A دمای شروع رشد، T_E دمای پایان رشد و $\Delta T_i = T_s - T_A$ میزان کاهش دمای محلول است.

با توجه به شکل (۳-۱) سیستم را تا یک دمای بالاتر از T_s حرارت می‌دهیم برای اینکه یک ترکیب همگن از اجزاء محلول را بدست بیاوریم. سپس آنرا سرد می‌کنیم و زیرلایه را آورده و در تماس با محلول قرار می‌دهیم تا در دمای T_A رشد شروع شود و در دمای T_E با برداشتن محلول از روی زیرلایه، خاتمه می‌یابد. و کوره را

به سرعت سرد می کنیم تا از افت دمایی لایه رشد داده شده جلوگیری شود. حال به روش سردکردن سرایشی می پردازیم [۱۱].



شکل (۴-۱) نمودار تغییرات دما- زمان در رشد LPE و روشهای مختلف سرد کردن [۱۱]

در این روش قبل از تماس محلول با زیرلایه هیچ کاهش دمایی صورت نمی گیرد و ΔT_i صفر می باشد ($\Delta T_i = 0 \Rightarrow T_A = T_S$) ولی بعد از تماس محلول و زیرلایه، سیستم بطور خطی و با آهنگ ثابت α از دمای $T_A = T_S$ تا T_E سرد می شود در واقع در این روش دمای شروع رشد، همان دمای اشباع T_S می باشد [۱۱ و ۲].

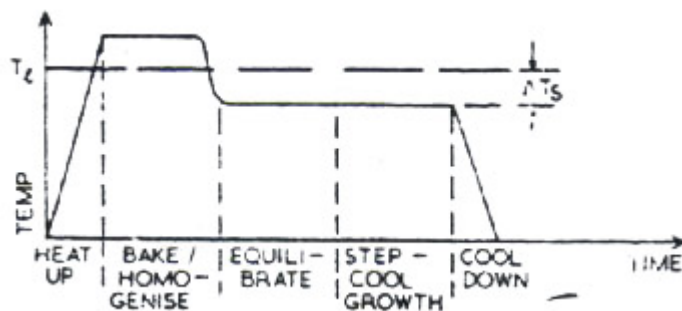
۱-۳-۱-۲- سرد کردن پله‌ای^{۲۱}

در این روش ابتدا محلول را با آهنگ ثابت به اندازه ΔT_S زیر خط مایع (T_1) سرد می کنیم اما به اندازه کافی پایین نیست برای جلوگیری از تشکیل رسوب آنی (خودبخود) در محلول، پس از رسیدن به دمای رشد که زیرلایه هم در این دما قرار دارد، آن را با زیرلایه تماس می دهیم و رشد آغاز می شود در این روش دما ضمن رشد ثابت است (شکل ۵-۱) [۱۴].

در این روش آهنگ سردسازی از روش سرایشی خیلی کندتر است و می توان با این روش لایه‌های با ضخامت کمتر رشد داد.

1- Step- Cooling

۲- سرد سازی پله‌ای، سرد سازی همدمای نیز نامیده میشود. (Isothermal growth)



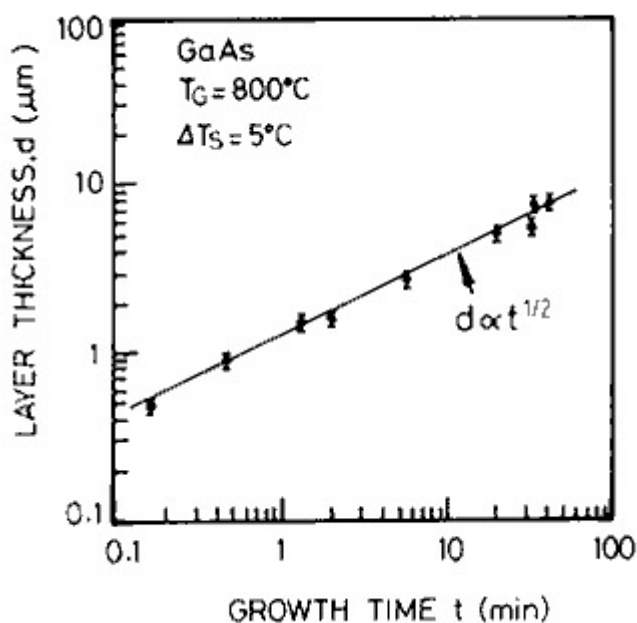
شکل (۵-۱) نمودار تغییرات دما- زمان در رشد LPE برای سرد سازی پله‌ای .

نمودار تغییرات ضخامت لایه بر حسب زمان رشد:

از نظر تئوری ضخامت لایه‌ها (d) با جذر زمان (t) متناسب است و این نکته از نظر تجربی نیز ثابت شده است

شکل (۶-۱)، بطور کلی این روش برای رشد نیمرساناهایی ترکیبی III-V در محدوده وسیعی کاربرد دارد [۱۵] و

[۳].



شکل (۶-۱) ضخامت لایه بر حسب زمان رشد برای روش پله‌ای

با توجه به شکلهای (۳-۱) و (۶-۱) آهنگ رشد در سردسازی پله‌ای آرامتر از روش سردسازی سرایشی است.

مزایای این روش:

الف- در این روش هسته‌بندی^۱ بهبود یافته است که از پارامترهای مهم برای ایجاد هماهنگی بین لایه و زیرلایه است [۱۴].

ب- در روش سردسازی پله‌ای، در یک دمای ثابت فرایند رشد صورت می‌گیرد بنابراین مشکلاتی که تغییر دما ضمن رشد بوجود می‌آورد حذف می‌شود [۱۶ و ۱۴].

ج) لایه‌های نازک رشد داده شده بوسیله تکنیک سردسازی پله‌ای ذاتاً صاف^۲، تخت و مسطح^۳ است [۱۵ و ۳].

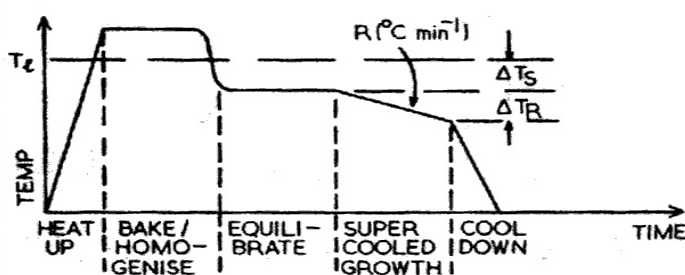
سرد کردن پله‌ای را به اینصورت نیز می‌توان بیان کرد. با توجه به شکل (۱-۴) در این روش، ابتدا محلول به اندازه $\Delta T_i = T_s - T_A$ زیردمای اشباع سرد می‌شود و آنگاه با زیرلایه که در دمای T_A است تماس داده می‌شود و دما در طول رشد ثابت می‌ماند $(T = T_A = T_E)$ [۱۱].

این روش به طور ویژه جالب است (Step cooling) زیرا اگر حجم محلول بقدر کافی بزرگ باشد ΔT ثابت باقی می‌ماند و سیستم می‌تواند بوسیله یک نقطه ثابت روی دیاگرام فاز معرفی شود، این شرایط حتی برای سیستمهای چند مولفه‌ای دلخواه، در جائیکه قانون رشد می‌تواند بدست آید حاکم است [۱۱].

۱-۳-۱-۳- سردسازی ابرسرمایش^۴

در این روش ابتدا محلول را با یک آهنگ ثابت به اندازه ΔT_s ، زیر خط مایع سرد می‌کنیم بدون تشکیل رسوب آنی (خودبخود) در محلول، تا دمای محلول به دمای شروع رشد برسد، زیرلایه و محلول در این دما با یکدیگر تماس می‌یابند سپس مجموعه محلول و زیرلایه با آهنگ ثابت R تا دمای مورد نظر سرد می‌شوند. در واقع این روش ترکیب، سردسازی پله‌ای و سراسیبه است. بنابراین روش، روشی دوگانه است (شکل ۱-۷) [۱۴ و ۳].

-
- 1- Nucleation
 - 2- Smooth
 - 3- Flat
 - 4- Supercooling



شکل (۷-۱) نمودار تغییرات دما- زمان در رشد LPE برای ابر سرمایش

مزایای این روش [۱۶ و ۱۵ و ۱۴ و ۱۳]:

الف- هسته‌بندی در آن، از دو روش فوق بهتر است.

ب- توانایی ساخت و رشد لایه‌های با کیفیت خوب و ضخامت مناسب امکانپذیر است. بنابراین در این روش، تکرارپذیری^۱ و یکنواختی^۲ ضخامت لایه بهبود می‌یابد.

ج- در رشد لایه‌های رونشستی غیرمتجانس کاربرد فراوانی دارد.

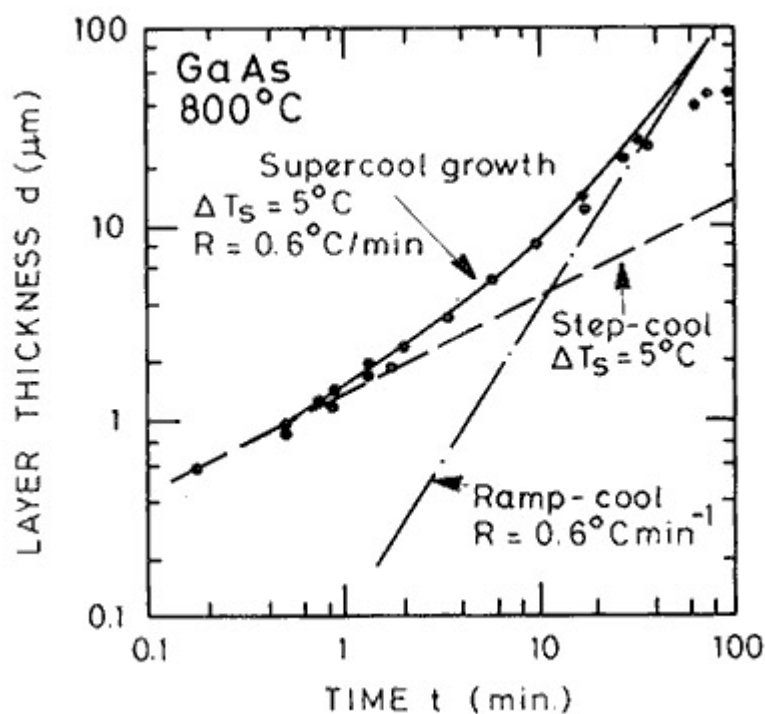
د- تکنیک ابرسرمایش از لحاظ ارزش عملی قابل توجه است زیرا بهره‌دهی لایه‌های خیلی یکنواخت، تخت و مسطح و قابل تولید بودن ضخامتهای از رنج ۰/۱ تا ۱۰ میکرون را به ما می‌دهد.

روش ابرسرمایش را با توجه به شکل (۱-۴) می‌توان به اینصورت نیز بیان کرد. در آن ابتدا محلول به اندازه $\Delta T_i = T_s - T_A$ با آهنگ ثابت سرد می‌شود و آنگاه در دمای T_A با زیرلایه که در همین دماست تماس داده می‌شود. بعد از تماس، دوباره سیستم بطور خطی و با آهنگ ثابت α از دمای T_A تا T_E سرد می‌شود، معمولاً آهنگ سرد کردن قبل از تماس محلول و زیرلایه، سریعتر از آهنگ سرد کردن بعد از تماس است [۱۹ و ۱۱].

در این پایانامه، از روش ابرسرمایش برای رشد لایه‌های رونشستی با ساختار نامتجانس $GaAs / Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ استفاده می‌شود.

نمودار تغییرات ضخامت لایه بر حسب زمان رشد:

نمودار تغییرات ضخامت لایه (d) با زمان (t) برای ابرسرمایش متناسب است با $d \propto (t^{\frac{1}{2}} + t^{\frac{3}{2}})$ که ابتدا ضخامت لایه متناسب با $t^{\frac{1}{2}}$ ، ولی وقتی زمان رشد افزایش می یابد وابستگی زمانی به $t^{\frac{3}{2}}$ تغییر می کند، این به این معنی است که روش ابرسرمایش برای یک بازه گسترده ای از ضخامتها مناسب است. نمودار تغییرات ضخامت بر حسب زمان رشد برای لایه های GaAs رشد داده شده بوسیله این روش در دمای T برابر 800°C و $\Delta T_i = \Delta T_o = 5^{\circ}\text{C}$ و $\alpha = 0.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ بصورت شکل زیر است [۳۰۲ و ۱۵۰۳].



شکل (۸-۱) ضخامت لایه بر حسب زمان رشد برای روش ابرسرمایش

۱- همان ابرسرمایش اولیه است.

۲- همان آهنگ سرد کردن ثابت بعد از شروع رشد است.