



دانشگاه کاشان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

**پایان نامه**

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

عنوان

**تاثیر یک محیط پاشنده بر روی فرآیندهای تداخلی تداخل سنج**

**اصلاح شده مایکلسون جدید**

استاد راهنما

**دکتر بهرام جزی**

به وسیله

**افسانه باقری خرزوقی**

بهار ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# تقدیم به

## پدر و مادر عزیز

## و همسر مهربانم

که هر چند کلامم از بیان سخنی در خور شأن پدر و مادر و همسرم کوتاه است ، اما از این عزیزترین کسانم که صبورانه مرا در مسیر کسب علم و دانش همراهی کردند و همیشه خود را مدیون فداکاری های آنان می دانم سپاسگذاری می کنم و بوسه سپاس بردستان پر مهرشان می زنم .

خدای عز و جل را به بزرگی یاد می کنم و در برابر مقام ربوبیتش سر به سجده  
شکر می گذارم و او را سپاس می گویم که هر چه دارم از خوان کرم اوست .  
پس از حمد خداوند بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ و راهنمایی های  
ارزنده استاد بزرگوارم، **جناب آقای دکتر بهرام جزی** که راهنمایی مرا در  
این پژوهش بر عهده گرفتند تشکر و قدردانی نمایم .

همچنین از تشریک مساعی **جناب آقای دکتر مجید منعم زاده** و  
**جناب آقای دکتر سید احسان روزمه** به عنوان اساتید داخل دانشگاه که  
این پایان نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده اند  
تشکر می نمایم.

در پایان از **جناب آقای دکتر سید حسین رسا** که به عنوان نماینده  
تحصیلات تکمیلی دانشگاه قبول زحمت نموده اند سپاسگزاری می نمایم.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول : تداخل سنج مایکلسون

۱-۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	پیدایش تداخل سنج مایکلسون و عملکرد آن	۲
۳-۱	بررسی ویژگی های اصلی تداخل سنج	۵
۴-۱	توزیع شدت فرانژها	۶
۵-۱	معادل اپتیکی تداخل سنج	۷
۵-۱-۱	بررسی تشکیل انواع فرانژهای تداخلی	۸
۶-۱	دگر گونه های تداخل سنج مایکلسون	۱۴

### فصل دوم : کاربردهایی از تداخل سنج مایکلسون و تبدیلات فوریه

۱-۲	اندازه گیری طول موج لیزر مجهول	۱۶
۱-۱-۲	اجزای تداخل سنج و عملکرد آن	۱۷
۲-۲	اندازه گیری ضریب شکست منشورهای تک محوری با سطوح موازی	۱۹
۱-۲-۲	بررسی عملکرد تداخل سنج	۲۰
۲-۲-۲	بررسی مشکلات تداخل سنج و خطاهای آزمایش	۲۴

- ۲-۳- اندازه گیری ضریب شکست هوا ..... ۲۵
- ۲-۴- بررسی اثر لیزر اکسایمر بر روی جامدات به کمک تداخل سنج مایکلسون ..... ۲۸
- ۲-۴-۱- بررسی عملکرد تداخل سنج ..... ۲۹
- ۲-۵- تبدیلات فوریه ..... ۳۴
- ۲-۵-۱- تبدیل فوریه تابع غیر متناوب ..... ۳۵
- ۲-۵-۲- کاربردی از تبدیل فوریه در تداخل سنج مایکلسون ..... ۳۶

### **فصل سوم: عوامل موثر بر پهنای خطوط طیف و تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده با کنج متحرک**

- ۳-۱- بررسی عوامل مختلف بر پهنای خطوط طیف ..... ۳۷
- ۳-۱-۱- پهنای طبیعی خطوط ..... ۳۸
- ۳-۱-۲- بر هم کنش با ذرات مجاور ..... ۳۹
- ۳-۱-۳- پهنای دوپلری ..... ۳۹
- ۳-۱-۴- روش کاهش پهنای دوپلری (چشمه باریکه اتمی) ..... ۴۲
- ۳-۲- تداخل سنج اصلاح شده جدید با کنج متحرک ..... ۴۴
- ۳-۲-۱- اجزای اصلی تداخل سنج و عملکرد آن ..... ۴۶
- ۳-۲-۲- روش یافتن توزیع طیف تابشی ..... ۵۰
- ۳-۲-۳- تابع قطع ..... ۵۲

## فصل چهارم: بررسی اثرپاشندگی محیط بر الگوهای تداخلی تداخل سنج اصلاح شده با کنج متحرک

- ۱-۴ - ضریب شکست هوا در شرایط استاندارد ..... ۵۴
- ۲-۴ - ضریب شکست هوا در دمای  $t$  و فشار  $p$  ..... ۵۶
- ۳-۴ - ضریب شکست هوای مرطوب ..... ۵۹
- ۴-۴ - بررسی گراف های مربوط به تداخل سنج مایکلسون جدید ..... ۶۱
- ۱-۴-۴ - بررسی در حالت خلا و با صرف نظر از پهنای دوپلری ..... ۶۱
- ۲-۴-۴ - بررسی در محیط خلا و با در نظر گرفتن پهنای دوپلری ..... ۶۹
- ۳-۴-۴ - بررسی در محیط پاشنده و بدون در نظر گرفتن پهنای دوپلری ..... ۷۲
- جمع بندی و نتیجه گیری ..... ۹۵
- فهرست مراجع ..... ۹۶
- پیوست الف ..... ۱۰۰

## فهرست شکلهای

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱ - پیکر بندی تداخل سنج مایکلسون .....
۷	شکل ۱-۲ - معادل اپتیکی تداخل سنج مایکلسون .....
۸	شکل ۱-۳ - تداخل سنج مایکلسون با چشمه نقطه ای .....
۸	شکل ۱-۴ - معادل اپتیکی تداخل سنج مایکلسون با چشمه نقطه ای .....
۹	شکل ۱-۵ - شکل گیری فرانژهای دایره ای در دستگاه اپتیکی معادل .....
۱۱	شکل ۱-۶ - تداخل سنج مایکلسون شامل چشمه با باریکه های موازی . .....
	شکل ۱-۷ - معادل اپتیکی تداخل سنج در حالتی که دو آینه موازی و چشمه شامل باریکه های موازی است .....
۱۲	شکل ۱-۸ - تشکیل فرانژهایی با ضخامت برابر در دستگاه اپتیکی معادل .....
۱۳	شکل ۱-۹ - پیکر بندی تداخل سنج ماخ زندر .....
۱۵	شکل ۲-۱ - پیکر بندی تداخل سنج اصلاح شده جهت اندازه گیری طول موج لیزر مجهول .....
۱۷	شکل ۲-۲ - پیکر بندی تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده جهت اندازه گیری ضریب شکست منشور .....
۲۰	شکل ۲-۳ - نقش فرانژها در حالتی که نمونه در دو حالت ۱ و ۳ از موقعیت اولیه خارج شده و در حالت ۲ در موقعیت اولیه قرار گرفته .....
۲۱	



- شکل ۲-۴- نمونه در حالت a در موقعیت اولیه قرار دارد و در حالت b از موقعیت اولیه به اندازه  $\alpha$  حول مرکز چرخیده ..... ۲۲
- شکل ۲-۵- مقایسه طول موج امواج الکترومغناطیس در خلا و هوا ..... ۲۵
- شکل ۲-۶- پیکر بندی تداخل سنج مایکلسون جهت تجزیه جامدات ..... ۳۰
- شکل ۲-۷- وابستگی زمانی سیگنال تداخل سنج (منحنی بالا) و سیگنال مربوط به  $Al^*$  (منحنی پایین) ..... ۳۲
- شکل ۲-۸- وابستگی زمانی سیگنال تداخل سنج (منحنی بالا) و سیگنال مربوط به  $C_2^*$  (منحنی پایین) ..... ۳۳
- شکل ۳-۱- جابجایی دوپلری خط تک رنگ ..... ۴۲
- شکل ۳-۲- طرحواره مشاهده خطوط طیفی یک باریکه اتمی ..... ۴۳
- شکل ۳-۳- اصل کار بازتابنده چشم گربه ای ..... ۴۴
- شکل ۳-۴- بازتابنده سه گوشه مکعبی به عنوان برشی از یک مکعب تو خالی ..... ۴۵
- شکل ۳-۵- اصل کار بازتابنده گوشه مکعبی ..... ۴۶
- شکل ۳-۶- تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده با کنج متحرک ..... ۴۷
- شکل ۳-۷- حرکت کنج متحرک از موقعیت اولیه در محیط با ضریب شکست n ..... ۴۸

## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۳-۱ - توزیع طیف تابشی بر حسب طول موج در یک سیستم دلخواه	۳۸
نمودار ۳-۲ - توزیع طیف تابشی و مقایسه نیم پهنای دوپلری با افزایش دما	۴۱
نمودار ۴-۱ - ضریب شکست هوا در شرایط استاندارد بر حسب $\sigma$	۵۶
نمودار ۴-۲ - ضریب شکست دما در دمای $t$ و فشار $p$ بر حسب $\sigma$	۵۸
نمودار ۴-۳ - ضریب شکست هوای مرطوب بر حسب $\sigma$	۶۰
نمودار ۴-۴ - شدت بر حسب $\Delta$ در سه طول موج متفاوت (a) و پهنای باند بر حسب $\sigma$ (b)	۶۳.....
نمودار ۴-۵ - توزیع شدت بر حسب $\Delta$ در تداخل سنج اصلاح شده به ازای $(\mu\text{m})^{-1} = -0.054$	$d\sigma = -0.054$
(a) و شدت بر حسب $\Delta$ به ازای $(\mu\text{m})^{-1} = -0.07$ (b) و توان تفکیک بر حسب $\Delta$ (c)	۶۷.....
نمودار ۴-۶ - توزیع شدت بر حسب $\Delta$ متشکل از طیف طول موج ها	۶۸
نمودار ۴-۷ - توزیع شدت بر حسب $\Delta$ برای چشمه با نور غیر تکفام در یک سیستم دلخواه	۷۰.....
نمودار ۴-۸ - توزیع طیف تابشی بر حسب $\sigma$ وقتی که اشعه ی تابشی حامل دو طول موج $\lambda_1$ و $\lambda_2$ در یک سیستم دلخواه است	.....
	۷۱
نمودار ۴-۹ - توزیع شدت بر حسب $\Delta$ وقتی اشعه ی تابشی حامل دو طول موج $\lambda_1$ و $\lambda_2$ است	.....
	۷۲

نمودار ۴-۱۰ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه طول موج متفاوت (a) و مقایسه ی پهنای باند در محیط خلا و محیط پاشنده (هوای خشک در شرایط استاندارد) (b) ..... ۷۴

نمودار ۴-۱۱ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه دمای متفاوت (a) و پهنای باند بر حسب  $\sigma$  در دو دمای مختلف و فشار ثابت (b) ..... ۷۶

نمودار ۴-۱۲ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه فشار مختلف (a) و پهنای باند بر حسب  $\sigma$  در دمای ثابت و دو فشار مختلف (b) ..... ۷۸

نمودار ۴-۱۳ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه فشار بخار آب متفاوت (a) و پهنای باند بر حسب  $\sigma$  در  $p, t$  ثابت و دو فشار بخار آب مختلف (b) ..... ۸۰

نمودار ۴-۱۴ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه فشار هوای متفاوت (a) و پهنای باند بر حسب  $\sigma$  در  $f, t$  ثابت و دو فشار هوای مختلف (b) ..... ۸۲

نمودار ۴-۱۵ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه دمای متفاوت (a) و پهنای باند بر حسب  $\sigma$  در  $f, p$  ثابت و دو دمای مختلف (b) ..... ۸۳

نمودار ۴-۱۶ - شدت بر حسب  $\Delta$  در محیط خلا و محیط پاشنده (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در محیط خلا و محیط پاشنده (b) ..... ۸۵

نمودار ۴-۱۷ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه دمای مختلف (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در دو دمای متفاوت (b) ..... ۸۷

نمودار ۴-۱۸ - شدت بر حسب  $\Delta$  در سه فشار مختلف (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در دو فشار متفاوت (b) ..... ۸۹

نمودار ۴-۱۹ - شدت بر حسب  $\Delta$  در محیط هوای مرطوب در سه دمای مختلف (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در دو دمای متفاوت (b) ..... ۹۱

نمودار ۴-۲۰ - شدت بر حسب  $\Delta$  در محیط هوای مرطوب در سه فشار هوای مختلف (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در دو فشار متفاوت (b) ..... ۹۲

نمودار ۴-۲۱ - شدت بر حسب  $\Delta$  در محیط هوای مرطوب در سه فشار بخار آب مختلف (a) و توان تفکیک بر حسب  $\Delta$  در دو فشار متفاوت (b) ..... ۹۳

## فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۴۲ .....	جدول ۱-۳ - مقایسه پهنای دوپلری برای چهار طول موج مختلف در دمای اتاق .....
۵۵ .....	جدول ۱-۴ - اجزای ترکیبی هوای خشک .....

فهرست علائم و اختصارات (Abbreviations)

*nm*

*nano meter*

*μm*

*micro meter*

*mm*

*mili meter*

## فصل اول

### تداخل سنج مایکلسون

#### ۱-۱- مقدمه

ابزاری را که برای بررسی تداخل نور و نقش فریز ناشی از اختلاف راه نوری به روشهای مختلف طراحی می شود، تداخل سنج اپتیکی<sup>۱</sup> می نامند. [۱] این توصیف کلی باید تنوع گسترده طراحی ها و موارد استفاده تداخل سنج را نشان دهد. در یک تداخل سنج برای به دست آوردن تداخل بین دو باریکه همدوس<sup>۲</sup> نور باریکه اولیه به دو یا چند قسمت تقسیم شده که پس از پیمودن راه های نوری مختلف به هم می پیوندند و یک نقش تداخلی را به وجود می آورند.

یک معیار برای رده بندی گسترده تداخل سنج ها را می توان تفاوت در نحوه تقسیم شدن باریکه ی اولیه در آن ها دانست. در تداخل سنجی مانند دو شکافی یانگ تداخل از طریق تقسیم جبهه موج صورت می گیرد و در تداخل سنج های تقسیم دامنه از نوعی تقسیم گر باریکه استفاده می شود که باریکه اولیه را به دو قسمت تقسیم می کنند، تداخل سنج مایکلسون<sup>۳</sup> از این نوع است .

---

<sup>۱</sup>. Optical interferometer

<sup>۲</sup>. Coherence

<sup>۳</sup>. Michelson interferometer

در تداخل سنج مایکلسون همان گونه که میدانیم، معمولاً تقسیم باریکه به وسیله یک لایه نیم بازتابنده فلزی یا دی الکتریک<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. همچنین می‌توان در دسته بندی دیگری روش های تداخل را به دو باریکه‌ای یا چند باریکه‌ای مانند تداخل سنج فابری پرو<sup>۲</sup> تقسیم کرد. برای طیف نمایی با توان تفکیک<sup>۳</sup> بالا فقط دو نوع تداخل سنج فابری پرو و مایکلسون حایز اهمیت هستند. تداخل سنج فابری پرو دستگاهی چند باریکه با توان تفکیک بالا است و تداخل سنج مایکلسون یک تداخل سنج دو باریکه‌ای است که اهمیت آن در بدست آوردن تبدیل فوریه<sup>۴</sup> یک طیف است.

## ۱-۲- پیدایش تداخل سنج مایکلسون و عملکرد آن

دانشمندان قرن نوزدهم بر این باور بودند که محیطی نامرئی و بدون جرم به نام اتر<sup>۵</sup> وجود دارد که تمام فضا را پر کرده و با وسیله های مکانیکی قابل آشکار سازی نیست و وجود آن برای انتشار امواج نورانی لازم است. با اندازه گیری سرعت حرکت زمین در اتر میتوان دلیلی برای وجود آن بدست آورد. مایکلسون و مورلی<sup>۶</sup> در این زمینه تداخل سنجی ارائه کردند که شامل دو آینه عمود بر هم و یک آینه نیمه نقره اندود شده و آشکار ساز<sup>۷</sup> بود.

---

<sup>۱</sup>. Dielectric

<sup>۲</sup>. Fabry-perot interferometer

<sup>۳</sup>. Power resolution

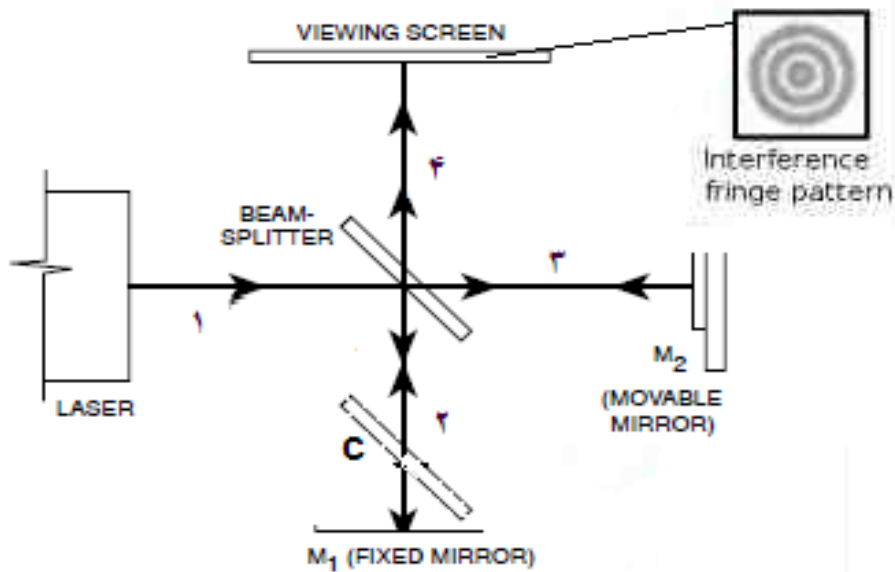
<sup>۴</sup>. Fourier transforme

<sup>۵</sup>. Ether

<sup>۶</sup>. Morley

<sup>۷</sup>. Detector





شکل (۱-۱): پیکر بندی تداخل سنج مایکلسون [ ۱ ]

اهمیت و شهرت این تداخل سنج بدلیل تقسیم دامنه موج فرودی<sup>۱</sup> است. در این ساختار یکی از آینه ها مجهز به پیچ تنظیم شیب است که به کمک آن می توان دو آینه را بر هم عمود کرد و هم چنین شامل یک پیچ ریز سنج دقیقی است که بتوان یکی از آینه ها را جابجا کرد.

مطابق شکل (۱-۱)، باریکه نورا<sup>۱</sup>، پس از خروج از چشمه گسترده S با شکافنده<sup>۲</sup> (شیشه ای که روی سطح جلوی آن با یک لایه نیم شفاف نازک دی الکتریک پوشانده شده ) برخورد میکند و به دو باریکه ۲ و ۳ با شدت های برابر و با اختلاف فاز  $\pi$  تقسیم می شود. این دو باریکه به آینه های کاملا بازتابنده  $M_1$  و  $M_2$  ، برخورد کرده و پس از انعکاس از این آینه ها و بازگشت به تقسیم گر باریکه، دو باریکه با هم تداخل می کنند و به شکل باریکه ۴ از تداخل سنج خارج می شوند.

به این ترتیب باریکه ۴ شامل پرتوهایی است که راه های نوری مختلفی را طی کرده اند و به دلیل تداخل، فرانژهای تداخلی به وجود آمده اند که به وسیله آشکارساز مشاهده می شوند.

- 
۱. Incident wave
  ۲. Beam splitter
  ۳. Phase difference

همان گونه که در شکل (۱-۱) مشاهده می کنیم، باریکه ۳ سه بار از شکافنده عبور می کند، در حالی که باریکه ۲ تنها یک بار از آن عبور می کند ضخامت های هوا و شیشه در هر دو بازو باید با هم برابر باشد، اگر چه برای یک چشمه تکفام با یک طول موج<sup>۱</sup> برای مساوی شدن راه های نوری دو باریکه می توان این کار را با افزایش مناسب فاصله بین شکافنده و  $M_1$  انجام داد، اما این تصحیح در سایر طول موج ها بدلیل پاشندگی شیشه کافی نیست، برای جبران همزمان در تمام طول موج ها یک تیغه جبران کننده C از جنس شکافنده و با همان ابعاد در مسیر باریکه ۲ و موازی با شکافنده قرار داده می شود.

هر گونه اختلاف فاز میان باریکه های ترکیبی سبب تشکیل فرآورده های تداخلی می شود. با در نظر گرفتن حرکت زمین در اثر دو عامل سبب ایجاد این اختلاف فاز می باشد.

الف) اختلاف راه نوری که باریکه ها طی می کنند.

ب) اختلاف میان زمان لازم برای طی مسیر های ۱ و ۲ که به علت حرکت زمین در اثر می باشد.

اگر زمین با سرعت  $v$  داخل اثر حرکت کند و تداخل سنج را به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  بچرخانیم با جابجا شدن دو بازو عامل اول تغییر نمی کند ولی عامل دوم تغییر می کند زیرا بازویی که قبل از چرخش در جهت حرکت زمین قرار داشت پس از چرخش در عرض حرکت زمین قرار می گیرد بنابر این انتظار داریم فریزها از تاریک به روشن تغییر علامت دهند ولی با انجام آزمایش تغییر قابل ملاحظه ای در نقش فریزها مشاهده نشد و به این ترتیب فرضیه وجود اثر از بین رفت.

بنابراین اختلاف فاز میان باریکه ها تنها به علت اختلاف راه نوری است که باریکه های ترکیبی طی می کنند. این اختلاف راه نوری که بین دو باریکه ترکیبی وجود دارد برابر است با:

$$\Delta = 2nd \cos \theta \quad (1 - 1)$$

در رابطه (۱-۱)،  $n$  ضریب شکست<sup>۲</sup> محیط و  $d$  میزان جابجایی آینه متحرک و زاویه  $\theta$  معرف شیب باریکه ها نسبت به محور اپتیکی می باشند.

---

<sup>۱</sup> . Wave length

<sup>۲</sup> . Refractive index

## ۱-۳- بررسی ویژگی های اصلی تداخل سنج

ویژگی های اصلی اجزای تداخل سنج عبارتند از : [۲]

الف) عمق پوسته آینه های اصلی  $M_1$  و  $M_2$  باید  $\frac{\lambda}{20}$  و عمق پوسته شکافنده  $\frac{\lambda}{10}$  می باشد.

ب) دلیل تغییر موقعیت اجزای نوری در فرکانس ها و لرزش های شدید تداخل سنج روی یک تخته یا جسم سنگین سوار است.

ج) پایه های شکافنده و آینه ها در مقابل لرزشها و تغییرات دمایی پایدار است.

د) جابجایی آینه متحرک موازی با خود آینه و با سرعت انتقال  $0.3 \frac{mm}{s}$  صورت می گیرد.

ت) دامنه موج عبوری و بازتابی با هم برابر است در غیر این صورت شدت الگوی تداخلی کاهش می یابد.

ه) اگر تداخل ویرانگر باشد نور در لایه شکافنده جذب می شود و اگر شکافنده دی الکتریک باشد نور به طرف منبع منعکس می شود.

خ) حداکثر میزان اختلاف راه برای مشاهده شدن فرانژهای تداخلی باید کوچکتر از طول همدوسی<sup>۱</sup> چشمه باشد.

چشمه هایی که آن ها را تکفام می نامیم، نوری گسیل میکنند که می توان آن را به عنوان دنباله ای از قطارهای موج هماهنگ با طول متناهی در نظر گرفت که هر کدام با تغییر فاز از هم جدا شده اند این تغییرات فاز معرف فرآیندی هستند که طی آن اتم های برانگیخته چشمه نور گذارهایی بین ترازهای انرژی انجام می دهند. یک چشمه معین را می توان با طول عمر قطار موج متوسط  $\tau_0$  که زمان همدوسی نام دارد مشخص کرد و طول همدوسی به صورت  $l_t = c\tau_0$  تعریف می شود که  $c$  سرعت نور در خلا می باشد.

---

<sup>۱</sup>. Coherence length

## ۴-۱ - توزیع شدت فرانژها

تداخل نور براساس اصل برهم نهی خطی میدان های الکترو مغناطیسی استوار می باشد، طبق این اصل میدان الکتریکی که در یک نقطه از فضا به وسیله دو موج ایجاد می شود برابرحاصل جمع میدان های الکتریکی دو موج است. در تداخل سنج مایکلسون دامنه مختلط حاصل از برهم نهی دو پرتو عبوری و بازتابی که دارای دامنه های برابر و با اختلاف فاز  $\delta$  می باشند به صورت رابطه ی زیر، بیان می شود.

$$A = A_0(1 + e^{i\delta}) \quad (۲ - ۱)$$

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad (۳ - ۱)$$

در روابط بالا  $\Delta$ ، بیانگر اختلاف راه نوری میان دو باریکه ترکیبی و  $\lambda$  طول موج نور ورودی می باشد. شدت فرانژهای مشاهده شده با مربع دامنه میدان الکتریکی بر آیند متناسب است و به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I = C \varepsilon_0 \langle AA^* \rangle \quad (۴ - ۱)$$

در رابطه بالا،  $C$  و  $\varepsilon_0$  به ترتیب سرعت نور در خلا و ثابت گذردهی خلا می باشند. با جایگزینی رابطه (۲-۱) در رابطه (۴-۱) خواهیم داشت:

$$I = 2\varepsilon_0 C A^2 (1 + \cos \delta) \xrightarrow{I_0 = 4\varepsilon_0 C A^2} I(\Delta) = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \delta) \quad (۵ - ۱)$$

اگر  $\Delta$  مضرب صحیحی از  $\lambda$  باشد تداخل سازنده<sup>۱</sup> و فرانژهای روشن مشاهده می شود و اگر  $\Delta$  مضرب نیم صحیحی از  $\lambda$  باشد تداخل ویرانگر<sup>۲</sup> و فرانژهای تاریک مشاهده می شود.

---

<sup>۱</sup>. Constructive

<sup>۲</sup>. Destructive