۱۴۴۹۹

بسمه تعالی

دانشگاه تربیت معلم

دانشکده علوم ـ گروه فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

عنوان:

بررسی خواص اسپکتروسکپی و الکترو-اپتیکی بلورهای مایع نماتیک آلاییده به رنگینه های آزو

استاد راهنما:

آقای دکتر محمد حسین مجلس آرا

نگارنده:

زهرا صیدالی لیر

شهریور ۱۳۸۸

۱۴۴۶۹۹

دانشگاه تربیت معلم

صورتجلسه دفاع از رساله دکترا/پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از رساله دکترا ☐ خانم ☐ زهرا صیدالی لیر دانشجوی رشته فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد ☐ آقای ☐

گرایش : اتمی ومولکولی دانشکده:علوم پایه

تحت عنوان:بررسی خواص اسپکتروسکپی والکترو- اپتیکی بلورهای مایع نماتیک آلاییده به رنگینه های آزو

درساعت ۱۵/۳۰ روزسه شنبه مورخ ۸۸/۶/۲۴درمحل آمفی تئاتر دانشکده علوم

با حضورامضا ءکنندگان ذیل تشکیل شد.

۱- استادراهنما : دکترمحمدحسین مجلس آراء

۲- استادراهنما : .....

۳-استادمشاور:.....

٤- نماینده تحصیلات تکمیلی : دکترمحمدحسین مجلس آراء

٥- عضو هیات علمی (داور) : دکترعزالدین مهاجرانی

٦- عضو هیات علمی (داور) : دکترجعفرجهان پناه

خانم /آقای زهراصیدالی لیر خلاصه کارهای تحقیقاتی خودرا ارائه نمودوپس ازپرسش وپاسخ، هیأت داوران کارتحقیقاتی خانم /آقای زهراصیدالی لیر رادرسطح دکتری ارزشیابی نموده وبرای نامبرده نمره ۱۹/۱۲ را منظور نموده است.

رئیس گروه / دانشکده

تهران – خیابان شهیددکترمفتح شماره ٤٩،کدپستی١٥٦١٤ تلفن :٨١٠٢٣

تقدیم به

دو فرشته همیشگی زندگی ام

پدر و مادر بسیار عزیزم مویتان سپید گشت

تارویم سپید بماند

در برابر وجود نازنینتان، زانوی ادب بر زمین می نهم

و با دلی مملو از عشق و محبت، بر دستان پر مهرتان بوسه می زنم

و با سپاس از آن همه ایثار، ثمره تلاشم را به قلب های مهربانتان تقدیم می کنم.

و به همسرم که با وجود پر مهرش، همواره همراه و همدل من بوده است.

به نام خداوند جان آفرین

حکیم سخن در زبان آفرین

به تماشا شوکند و به آغاز کلام

و به پرواز کبوتر از ذهن واژه ای در قفس است..... سهراب

به نام خداوندگاری که جان و جهان آفرید و به آدمی کلام آموخت تا سخن بگوید و خود به سخن سوگند خورد. خداوندی که زیباست و این همه زیبایی آفریده است. این همه نظم در کارگاه آفرینش و این همه حلقه اتصال که در عین پیچیدگی آدمی را به سمت و سوی معماری چیره دست و دانای کل رهنمون می دارد. و فیزیک دنیای سرشار از این راز و رمزهاست و دنیای بزرگ که در برابر اسرار آفرینش بسیار کوچک است. خداوند بزرگ را شاکرم که به من توان داد تا به دنیای زیبا و منظم پای بگذارم مگر راهی باریک بیابم به سمت دانایی و بینایی و پیوستن به او که دانا و بینای کل است. از خوبانی که در این راه با من همراه بودند سپاسگزارم:

آقای دکتر محمد حسین مجلس آرا استاد راهنما که تجربه و دانش سرشار ایشان چراغ فراروی من بود؛

آقای دکتر جعفر جهان پناه که کوچکترین گلی را از من دریغ نکردند و زحمت باز خوانی و داوری این پایان نامه بر دوش ایشان بود؛

آقای دکتر عزالدین مهاجرانی که زحمت باز خوانی و داوری این پایان نامه بر دوش ایشان بود؛

استاد شیخ الاسلامی به پاس حمایت های بی دریغشان؛

آقای دکتر ذاکر حمیدی که از نظرات و راهنمایی های ایشان بهره ها بردم؛

تمامی اساتید گروه فیزیک دانشگاه تربیت معلم که همواره لطف این بزرگواران شامل حال من بوده است؛

و تمامی دوستانی که کوچکترین حضورشان بزرگ ترین محبت ها را در برداشت دو خواهران و برادرانم به پاس مهربانی هایشان.

چکیده

در این تحقیق خواص اسپکتروسکپی و الکتریکی _ نوری بلورهای مایع نماتیک آلائیده به رنگینه آزو بررسی شده است. طول موج جذب سه رنگینه Sudan black B و Sudan III وSudan lV در حلال های اتانول و بلور مایع w1680 ، در ناحیه فوق بنفش- مرئی محاسبه شده است. نتایج تجربی نشان می دهد که حلال بلور مایع باعث انتقال طیف جذبی رنگینه به سمت طول موج های بالاتر می شود.تاثیر غلظت بر روی طیف های جذبی این رنگینه ها در حلال های اتانول و بلور مایع بررسی شده است و طبق نتایج تجربی ، افزایش غلظت تنها شدت جذب را افزایش می دهد و بیشینه طول موج جذب را جابجا نمی کند. گاف انرژی بلور مایع w1680 آلائیده به هر سه رنگینه محاسبه شد که کمترین گاف انرژی مربوط به رنگینه Sudan black B بود. نسبت دو رنگ نمایی و نیز پارامتر نظم برای هر یک از رنگینه ها بدست آمد که طبق نتایج تجربی بیشترین نسبت دو رنگ نمایی و پارامتر نظم مربوط به رنگینه Sudan black B بود. در این تحقیق تاثیر غلظت بر روی نسبت دو رنگ نمایی و پارامتر نظم بررسی شده است که طبق نتایج افزایش غلظت رنگینه ها باعث افزایش نسبت دو رنگ نمایی و پارامتر نظم می گردد. همچنین تاثیر غلظت بر روی گاف انرژی بررسی شد که طبق نتایج افزایش غلظت باعث کاهش گاف انرژی و افزایش رسانندگی می گردد. ضریب شکست غیر خطی مرتبه دوم رنگینه Sudan black B در حلال اتانول به دو روش ماره انتقالی و ماره در آرایش پمپ _ کاوه بدست آمده است.در اینجا آزمایش ها تحت لیزر پیوسته He-Ne با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر و بیشینه توان خروجی ۸۰ میلی وات و نیز لیزر پیوسته Nd:Yag با طول موج ۵۳۲ نانومتر و بیشینه توان خروجی ۵۰ میلی وات انجام شده است.در آزمایش ماره انتقالی غلظت $5.5 \times 10^{-3} \mathrm{gr/lit}$ ، و در آرایش پمپ-کاوه غلظت$0.05\ \mathrm{gr/lit}$ از این رنگینه مورد بررسی قرار گرفت، که ضریب شکست آن به ترتیب از مرتبه $10^{-6}\ \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{w}}$ و $10^{-5}\ \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{w}}$ بدست آمد.

فهرست کلی

عنوان: **صفحه:**

۱_فصل اول: معرفی بلورهای مایع..... ۱

۲_فصل دوم: اپتیک غیر خطی و مقایسه آن با اپتیک خطی..... ۲۶

۳_فصل سوم: مواد و روش ها..... ۴۸

۴_فصل چهارم: نتایج تجربی..... ۶۳

۵_فصل پنجم: تکنیک ماره..... ۹۲

۶_فصل ششم: بحث و نتیجه گیری..... ۱۱۱

۷_منابع..... ۱۱۸

فهرست تفصیلی

عنوان: **صفحه:**

۱_فصل اول: معرفی بلورهای مایع..... ۱

۱_۱_مقدمه..... ۲

۱_۲_تاریخچه بلورهای مایع..... ۳

۱_۳_ساختار شیمیایی بلورهای مایع..... ۴

۱_۳_۱_بنزیلیدین ها..... ۶

۱_۳_۲_استرها و دی استرها..... ۶

۱_۳_۳_سیانوبی فنیل ها..... ۷

۱_۳_۴_ساختارهای غیر آروماتیکی بلورهای مایع..... ۷

۱_۴_تعریف عمومی بلور مایع..... ۸

۱_۵_انواع بلورهای مایع..... ۱۰

۱_۵_۱_بلورهای مایع نماتیک..... ۱۱

۱_۵_۲_بلورهای مایع اسمکتیک..... ۱۳

۱_۵_۳_بلورهای مایع کلستریک..... ۱۴

۱_۶_پارامتر نظم..... ۱۴

۱_۷_نظریه پیوستگی و تغییر شکل بلور مایع..... ۱۶

۱_۸_رنگینه ها..... ۱۸

۱_۹_بلورهای مایع آلائیده به رنگینه..... ۱۹

۱_۱۰_دوشکستی بلورهای مایع..... ۱۹

۱_۱۱_بلورهای مایع در میدان الکتریکی..... ۲۱

۱_۱۲_کاربرد بلورهای مایع در صفحات LCD..... ۲۴

۲_فصل دوم: اپتیک غیر خطی و مقایسه آن با اپتیک خطی..... ۲۶

۲_۱_مقدمه..... ۲۷

۲_۲_اثر کر نوری..... ۲۷

۲_۲_۱_اثر کر نوری الکترون های مقید در جامدات..... ۲۸

۲_۲_۲_اثر کر باز چرخشی در مایعات..... ۲۹

۲_۳_ضریب جذب غیر خطی(NLA) و ضریب شکست غیر خطی(NLR) ۳۰

۲_۴_خود کانونی..... ۳۲

۲_۵_جذب دوفوتون..... ۳۹

۲_۶_رفتار محدودکنندگی نوری..... ۴۱

۲_۷_روش جاروب لبه..... ۴۳

۳_ فصل سوم:مواد و روش ها ۴۸

۳_۱_مواد..... ۴۹

۳_۱_۱_مواد میهمان..... ۴۹

۳_۱_۲_مواد میزبان..... ۵۰

۳_۲_جهت گیری مولکولهای بلور مایع..... ۵۱

۳_۲_۱_جهت گیری موازی یا هموژن(همگن) ۵۱

۳_۲_۱_۱_جهت گیری تحت میدان سطح ۵۲

۳_۳_اندازه گیری دو رنگ نمایی خطی و پارامتر نظم..... ۵۵

۳_۴_اسپکتروفتومتر جذبی..... ۵۹

۳_۴_۱_برانگیختگی الکترونی..... ۶۰

۳_۴_۲_اصول طیف سنجی جذبی..... ۶۱

۳_۵_نرم افزارهای مورد استفاده..... ۶۲

۴_فصل چهارم:نتایج تجربی..... ۶۳

۴_۱_رنگینه Sudan IV در حلال های همسانگرد و ناهمسانگرد..... ۶۴

۴_۲_رنگینه Sudan III در حلال های همسانگرد و ناهمسانگرد..... ۷۲

۴_۳_ رنگینه Sudan Black B در حلال های همسانگرد و ناهمسانگرد..... ۷۹

۵_فصل پنجم: تکنیک ماره..... ۹۲

۵_۱_تعریف نقش ماره یا فریزهای ماره..... ۹۳

۵_۲_تاریخچه ماره..... ۹۴

۵_۳_اندازه گیری ضریب شکست غیر خطی رنگینه Sudan Black B درحلال

اتانول با استفاده از پدیده تالبوت و انحراف سنجی ماره ای انتقالی..... ۹۵

۵_۴_ اندازه گیری ضریب شکست غیر خطی رنگینه Sudan Black B در حلال

اتانول با استفاده از پدیده تالبوت و انحراف سنجی ماره در آزمایش پمپ کاوه..... ۱۰۲

۶_فصل ششم:بحث و نتیجه گیری..... ۱۱۱

۷_منابع..... ۱۱۸

فصل اول

معرفی بلورهای مایع

۱-۱-مقدمه

خواص منحصر بفرد بلورهای مایع محققان را بر آن داشته تا برای رسیدن به کاربردهای جدید این مواد به بررسی دقیقتر این مواد بپردازند.از آنجا که بلورهای مایع ساختارهای نا همسانگرد با رفتار مکانیکی مایعات و خواص فیزیکی جامدات هستند،مورد توجه بسیاری از محققان واقع شده اند[۵-۱].

امروزه محیط بلور مایع و اثر این محیط بر روی مواد اضافه شده در آن،بعلت پدید آوردن رفتارهای جدید در مولکولهای میهمان،مورد توجه قرار گرفته است[۷-۵].بررسی های صورت گرفته نشان دهنده وجود ساختارهای انعطاف پذیر و منظم در محیط بلور مایع می باشد.این ساختارهای منظم،شبکه های مولکولی با رفتار فیزیکی منحصر بفردی را بوجود آورده اند،وجود چنین ساختارهایی،محیط حلالی متفاوت از دیگر گونه های حلالی را برای میهمانهای بلور مایع بوجود آورده است.[۱۰-۸]

شاید محیط منظم پلیمری نزدیک ترین شباهت به محیط بلور مایع را داشته باشد و وجود رفتارها ی مشابه بر میهمانهای رنگی اضافه شده در محیط پلیمری،که ناشی از رفتار شبکه ای این مواد هستند،می تواند تائیدی بر این مساله باشد.ولی تحریک پذیری و انعطاف پذیری بلور مایع،بخصوص در انواع نماتیک، تفاوتهای رفتاری بسیاری را در این دو سری از مواد نمایان نموده است[۱۱].

لذا برای ارائه یک مدل رفتاری برای بلورهای مایع نیاز به مدارک و شواهد بیشتر بنظر می رسد.دستیابی به چنین اطلاعاتی نیازمند بررسی های مختلف در زمینه های رفتاری بلورهای مایع می باشد.از کاربردی ترین زمینه های رفتاری بلورهای مایع،خواص نوری این مواد می باشد.این خواص،رفتارهای اسپکتروسکوپی و الکتریکی- نوری متعددی را در بلورهای مایع بوجود می آورد.برای بررسی رفتارهای اسپکتروسکوپی بلورهای مایع تکنیک های متعددی مورد توجه بوده است که از مهمترین این تکنیک ها می توان به بررسی های اسپکتروسکوپی ارتعاشی (IR)،جذبی (UV-Vis) و نشری (فلورسانس) اشاره نمود.[۱۶-۱۲]دربیشتر بررسی ها

تکنیک IR بعنوان یک روش بررسی مستقیم برای دست یابی به اطلاعات ساختاری و نظم گیری بلورهای مایع مورد استفاده قرار می گیرد و تکنیک های اسپکتروسکوپی جذبی و نشری به علت دارا بودن مشکلات دستگاهی و کاربردی از روش های غیر مستقیم بکار رفته می باشد.[۱۷]در راستای تحقیقات پیشین،در این پروژه به بررسی اسپکتروسکوپی و الکتریکی-نوری بلورهای مایع درحضور رنگینه های Sudan Black Bو Sudan III و Sudan IV می پردازیم.

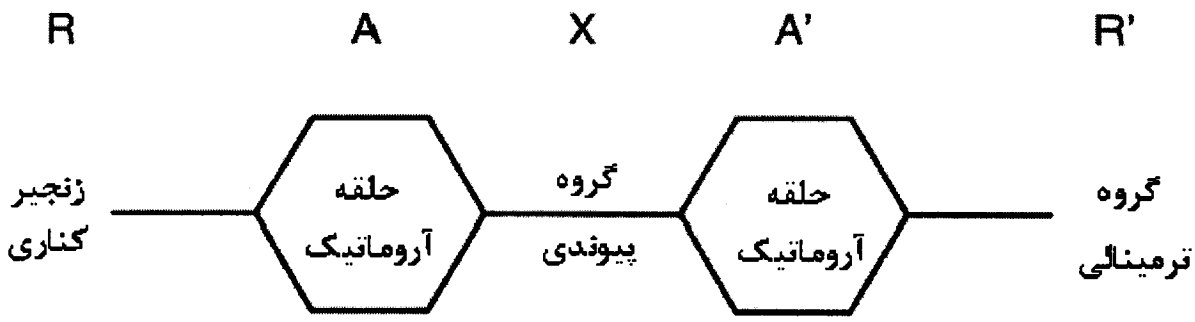
۱-۲-تاریخچه بلورهای مایع

تصور می شود کشف بلور مایع به حدود صد و پنجاه سال پیش بر می گردد اما تعریف کاملی از آن تا یکصد سال بعد از آن نیز تحقق نیافت.بلور مایع برای نخستین بار در سال ۱۸۸۸ بوسیله راینیتزر[۱] مشاهده گردید.راینیتزر که یک گیاه شناس اتریشی بود هنگام مطالعه بنزوات کلسترول متوجه وجود دو نقطه ذوب برای این ماده گردید.او دریافت که این جسم نخست در۱۴۵/۵ درجه سانتی گراد ذوب شده،مایعی کدربوجود می اورد که سپس در دمای ۱۷۸/۵ سانتی گراد ناگهان به رنگ آب مایل به بنفش شفاف تبدیل می گردد.در اثر سرد کردن نیز حالت کدر دوباره پدیدار گشته و سپس بلورهای سفید متبلور می گردد.راینیتزر نمونه را برای همکارش لهمان[۲] فرستاد.لهمان نیز مطالعه آن پدیده و پدیده های وابسته به آن راآغاز نمود و برای نخستین بار جهت نامگذاری این پدیده اصطلاح بلور مایع را بکار برد.[۱۸] تا سال ۱۸۹۰ تمامی بلورهای مایع یافته شده بصورت طبیعی وجود داشتند،اما در آن سال نخستین بلور مایع سنتزی (پارا-آزوکسی،آنیزول[۳]) توسط گاترمن[۴] و رتیزکه تولید شد و بعد از آن بلورهای مایع جدیدی سنتز گردید.

[1]Reinitzer
[2]Lehman
[3]P-azaxyanisole
[4]Gatterman

۱-۳-ساختار شیمیایی بلورهای مایع

برای اینکه یک ساختار شیمیایی بتواند از خود خواص بلور مایع نشان دهد سه شرط اساسی وجوددارد.۱.مسطح بودن۲.قطبش پذیری بالا۳.مولکول دارای قسمت سخت و قسمت انعطاف پذیر باشد.بسیاری از ترکیبات الی اروماتیک میتوانند دارای این شرایط باشند و اکثر ترکیبات مزوفرمیک[۵] شناخته شده دارای سیستم اروماتیکی هستند.ساده ترین ساختار شناخته شده برای بلورهای مایع ساختارعمومی زیر می باشد.



شکل (۱-۱): ساختارمولکولی بلورمایع نوعی

ترکیباتی که دارای ساختار فوق می باشند اکثراتشکیل بلور مایع نماتیک میدهند.گروه X که دو حلقه فنیل را بهم وصل می کنند در جدول (۱-۱) نشان داده شده است. باید توجه کرد که گروه های تشکیل دهنده X باید از گروه هایی باشند که قطبش پذیری کل ساختارمولکولی را تضعیف ننماید R و R گروه های کوچک یا زنجیره های کوتاه می باشند که می توانندقطبی یا غیر قطبی باشند.جدول گروه های مهم R و'R را نشان می دهدگروه های انتهایی R و 'Rدر تشکیل و پایداری نماتیک ها بسیار موثر می باشند البته نه به اندازه گروه مرکزی.انعطاف ناپذیری گروه مرکزی بسیار مهم بوده و مهم تر از حضور الکترون ها در گروه مرکزی است. میتوان گفت شکل هندسی مولکول در پایداری ان نقش اساسی دارد[۱۹].بلورهای مایع

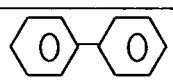
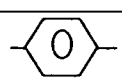
[5]-Messoformic

نماتیک برحسب ساختمان گروه مرکزی به سه دسته بنزیلیدها(X=-N-HC-)،استرها و دی استرها(X=-oC.o) وسیانو بی فنیل ها(پیوند ساده =X) طبقه بندی می شوند.

جدول(۱-۱): تعدادی از گروه های مهم X در ساختار نماتیک ها

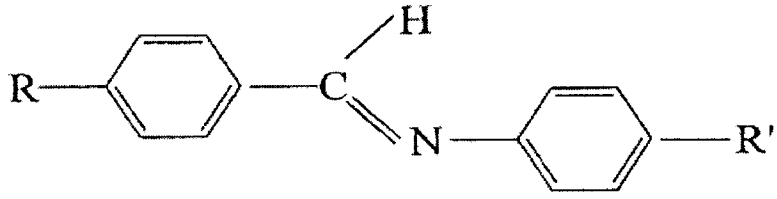
—X—	Name
—N = N—	azobenzenes
—N = oN—	azoxybenzenes
—CH = CH—	stilbenes(trans)
—C ≡ C—	tolanes
—CH = N (o)—	nitrones

جدول(۱-۲): تعدادی از گروه های R و R' در ساختار نماتیک

R	X	R'
$C_nH_{2n+1}O$—	 biphenyl	R
$C_nH_{2n+1}O$—	—HC = N—	—C ≡ N
$C_nH_{2n+1}OOC$—	—OOC—	—Cl
$C_nH_{2n+1}OOCO$—		—rB —F

۱-۳-۱-بنزیلیدین ها

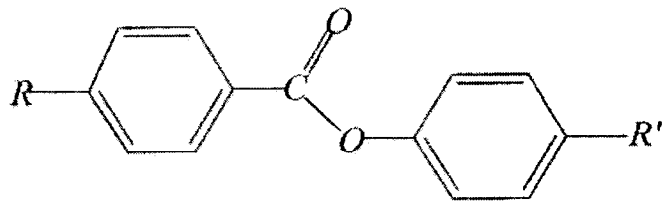
این دسته از بلورهای مایع نماتیک به راحتی از مشتقات بنزآلدئید و آنیلین سنتز می شوند و در حضورمقادیر جزئی اسید و یا رطوبت هیدرولیزمی گردند.این مواد از نظر شیمیایی چندانپایدارنیستند.ساختمان عمومی این مواد بصورت زیر نشان داده می شود.



شکل (۱-۲):ساختمان عمومی بلورهای مایع نماتیک بنزیلیدینی

۱-۳-۲-استرها و دی استرها

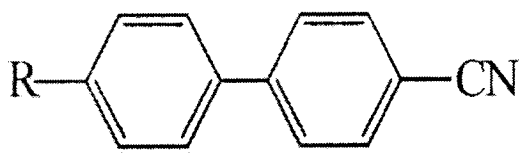
نسبت به بنزیلیدین ها ترکیباتی پایدارترند.این دسته از بلورهای مایع دارای خاصیت نماتیکی قویتری هستند که می تواند از مسطح بودن تقریبی این مواد باشد و باید گفت که این گروه نسبت به عوامل محیطی کمتر حساسیت نشان می دهند.ساختمان عمومی این مواد بصورت زیر نشان داده می شود[۲۱و۲۰].



شکل(۱-۳): ساختمان عمومی بلورهای مایع نماتیک استری

۱-۳-۳-سیانوبی فنیل ها

این دسته از بلورهای مایع پایدارتر از انواع قبلی می باشند و خاصیت بلور مایعی قوی تری نسبت به انواع بالایی دارند. پایداری بالا و بی رنگ بودن این مواد به همراه ناهمسانگردی دی الکتریکی آنهاباعث شده است که کاربردهای فراوانی در ساخت LCD ها داشته باشند[۲۲].ساختمان عمومی این موادبصورت زیر نشان داده می شود.



شکل (۱-۴):ساختمان عمومی بلورهای مایع نماتیک سیانوبی فنیلی

در تهیه مخلوط اتکتیکی نماتیک بعلت پایداری بالا و محدوده دمایی گسترده نماتیکی سیانو بی فنیل هااز ترکیب مخلوط این گروه از بلورهای مایع استفاده می شود.نمونه ای از مخلوط این گروه از بلورهای مایع استفاده می شود.نمونه ای از این مخلوط های اتکتیک،E۸ می باشد که بافت ساختاری آن در جدول (۱-۳) آمده است.

۱-۳-۴-ساختارهای غیر آروماتیکی بلورهای مایع

همانگونه که گفته شد اکثر بلورهای مایع دارای سیستم های آروماتیکی هستند ولی ساختارهای غیرآروماتیکی نیز می توانند حالت بلور مایع از خود نشان دهند.در اکثر بلورهای مایع لیوتروپیک مولکولهای

خطی با سر قطبی و دم غیر قطبی دیده می شود که سر قطبی می تواند گروه های قطبی مختلفی باشد، فرمول ساختاری این مواد بصورت زیر است.

$$R—X$$

گروه های R اکثرا هیدروکربونهایی با طول ۷ الی ۱۶ کربن بوده و گروه قطبی X می تواند از ترکیبات فسفر و یا گروه کربوکسیلیت و حتی حلقه های غیر آروماتیک متصل به عامل قطبی باشد.(۲۳)

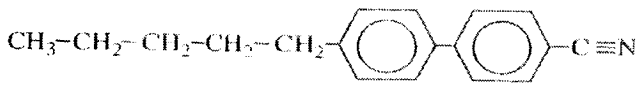
جدول(۱-۳) :مخلوط اتکتیک نماتیک E۸

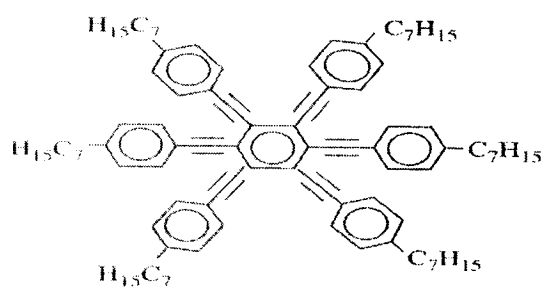
C_5H_{11}—⟨⟩—⟨⟩—CN	5CB	(45.0%)
C_3H_7O—⟨⟩—⟨⟩—CN	3OCB	(16.0%)
$C_5H_{11}O$—⟨⟩—⟨⟩—CN	5OCB	(12.0%)
$C_8H_{17}O$—⟨⟩—⟨⟩—CN	8OCB	(16.0%)
C_5H_{11}—⟨⟩—⟨⟩—⟨⟩—CN	5CT	(11.0%)

۱-۴-تعریف عمومی بلور مایع

بلورهای مایع دارای فازی بین جامدهای بلورین و مایع های همسانگرد هستند.ساختار آنها یا میله مانند

است (کالامیتیک[۶]) ویا دیسک مانند[۷]،که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. شکل (۱-۵ب) یک بلورمایع را نشان می دهد که شامل biphenyl که هسته سخت[۸]است و یک زنجیره ی هیدروکربنکه بصورت دنباله انعطاف پذیر[۹]است،می باشد.مدل فضایی آن در شکل (۱-۶ب) نشان داده شده استاگرچه خود مولکول به شکل استوانه ای نمی باشد اما همانطور که در شکل (۱-۷ب) نشان داده شده است،می توان آنرا بصورت یک استوانه در نظر گرفت.که این بخاطر در نظر گرفتن رفتار فیزیکی آن و چرخش سریع آن حول محور مولکول (در نتیجه گرما) می باشد.بلور مایع ضروری است که دارای یک هسته سخت و دنباله انعطاف پذیر باشد.اگر مولکول کاملا انعطاف پذیر باشد دارای نظم جهتی نخواهد بود و اگر کاملا سخت باشد در دمای بالا مستقیما بهفاز مایع تبدیل می شود.شکل (۱-۵ الف) مولکول بلور مایع دیسکی را نشان می دهد.در اینجا هم یک هسته سخت و دنباله انعطاف پذیر داریم.شاخه های آن تقریبا روی یک صفحه قرار دارند.شکل فضایی آن در (۱-۶ الف) نشان داده شده است. اگر هیچ گشتاور دو قطبی دائمی عمود بر صفحه مولکول وجود نداشته باشد آنرا می توان بصورت یک دیسک در نظر گرفت که رفتار فیزیکی آن در قسمت (۱-۷الف) نشان داده شده است،که این بدلیل چرخش سریع حول محور بلوری است[۲۴].





شکل (۱-۵):الف) ساختار دیسکی وب) ساختار میله ای بلور مایع

---

[۶]Calamitic
[۷]Discotic
[۸]Rigid
[۹]Flexible