بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تربیت معلم آذربایجان
دانشکده علوم پایه گروه فیزیک

پایان‌نامه مقطع کارشناسی‌ارشد
رشته فیزیک حالت جامد

محاسبه‌ی پذیرفتاری الکتریکی با درنظر گرفتن اثر برهمکنش اسپین- مدار راشبا در یک سیستم دوبعدی

اساتید راهنما:
دکتر کاظم جمشیدی‌قلعه
دکتر آرش فیروزنیا

پژوهشگر:
رحیمه شریف‌نیا

خردادماه/۱۳۸۹
تبریز/ ایران

تقدیم به دو نگین هستی

پدر و مادر عزیزم که گرمای بی‌دریغ وجودشان مایه‌ی دلگرمی‌ام و دعای خیر و تشویق‌هایشان تکیه‌گاه و روشنی‌بخش راهم بوده و خواهد بود.

تقدیر و تشکر

سپاس مهربانی را که حتی دمی، دریای بی‌انتهای لطفش را از من دریغ نساخت و حضور همواره‌اش آرام بخش قلبم و روشنی بخش زندگی‌ام بوده و همیشه بهتر از آن‌چه که می‌خواستم و لایقش بودم ارزانی‌ام داشته است.

این کار میسر نبود مگر به لطف خداوند و همراهی اساتید راهنمای محترم آقای دکتر کاظم جمشیدی و آقای دکتر آرش فیروزنیا که با راهنمایی‌هایشان مرا مشفقانه در این راه یاری نموده‌اند خالصانه کمال تشکر و قدردانی را دارم.

هم‌چنین از خانواده‌ی عزیزم و تمامی دوستانی که در طی تمام دوران تحصیل دلسوزانه همراه و مشوقم بوده‌اند تشکر می‌کنم .

رحیمه شریف نیا

۱۳۸۹/۳/۲۵

تبریز- ایران

عنوان صفحه

فهرست اشکال ..... ت

چکیده ..... یک

پیش‌گفتار ۱

فصل اول: پذیرفتاری الکتریکی ۳

۱-۱ مقدمه ٤

۱-۲ مفهوم قطبش الکتریکی در یک محیط دی‌الکتریک ۵

۱-۳ پذیرفتاری الکتریکی ۷

۱-٤ ضریب گذردهی و رابطه‌ی آن با پذیرفتاری ۸

۱- ۵ رابطه‌ی کلاسیوس موساتی ۱۰

۱-٦ خطی بودن و علیت ۱٤

۱-۷ پاسخ فرکانس و روابط پاشندگی ۱۷

۱-۸ روابط کرامرز کرونیک ۲۰

۱-۹ ضریب گذردهی و پذیرفتاری برای میدان‌های متغیر با زمان ۲۲

فصل دوم: برهمکنش اسپین- مدار راشبا ۲۵

۲-۱ مقدمه ۲٦

۲-۲ اسپین ترونیک ۲۷

۲-۳ برهمکنش اسپین- مدار ۳۳

۲-٤ برهمکنش اسپین- مدار راشبا ۳۵

۲-۵ قدرت اندرکنش راشبا در دیواره‌ی کوانتومی ۳۸

۲-٦ نوسان‌های شوبنیکوف- دوهاس ۳۹

۲-۷ برهمکنش اسپین- مدار راشبا در سطوح فلزی ٤۰

۲-۸ دینامیک اسپین در حضور برهمکنش اسپین- مدار راشبا ٤۱

۲-۹ دینامیک اسپین در حضور برهمکنش راشبا و برهمکنش زیمن ٤٤

۲-۱۰ بررسی تبهگنی حالتهای اسپینی درحضور اندرکنش راشبا ٤٤

۲-۱۱ اثر برهمکنش اسپین- مدار راشبا بر گاز الکترون دوبعدی ٤٦

فصل سوم : محاسبه‌ی ماتریس چگالی برای اختلال وابسته به زمان ٤۸

۳-۱ مقدمه ٤۹

۳-۲ عملگر چگالی ٤۹

۳-۲-۱ حالت خالص ۵۰

۳-۲-۲ حالت آمیخته ۵۱

۳-۳ محاسبه‌ی معادله‌ی حرکت برای ماتریس چگالی ۵۳

۳-٤ محاسبه‌ی ماتریس چگالی برای اختلال وابسته به زمان ۵٤

فصل چهارم : محاسبه‌ی پذیرفتاری الکتریکی ۵۷

٤-۱ مقدمه ۵۸

٤-۲ویژه مقادیر و ویژه حالات هامیلتونین ۵۹

٤-۳ محاسبه‌ی ماتریس چگالی تحت ویژه حالات انرژی ۵۹

٤-۳-۱ محاسبه‌ی $v_{kk'}^{\sigma\sigma'}$ ٦۰

٤-۳-۲ محاسبه‌ی $\rho_{1KK'}^{\sigma\sigma'}$ برای حالت تعادل ٦۲

٤-٤محاسبه‌ی $\mu_{kk'}^{\sigma\sigma'}$ ٦٤

٤-۵ محاسبه‌ی $\langle\mu\rangle$ ٦٤

٤-٦ عامل اتلاف ۷۲

٤-۷ محاسبات عددی ۷۳

٤-۸ بحث و نتایج ۷۳

٤-۸-۱ اثر دما روی قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری ۷۵

٤-۸-۲ اثر عامل اتلاف روی قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری ۷۷

٤-۸-۳ اثر قدرت راشبا روی قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری ۷۹

پیشنهادات ۸۱

فهرست منابع ۸۲

چکیده‌ی انگلیسی

فهرست اشکال

شکل(۱-۱): نمایش سهم‌های میدان الکتریکی محلی در المانی از سیستم ۱۲

شکل (۱-۲): نمودار طیف ضریب گذردهی دی الکتریک در حد فرکانس‌های بالا..... ۲۳

شکل (۲-۱): طرحی از ذخیره و انتقال و آشکارسازی اطلاعات توسط اسپین..... ..... ۲۸

شکل(۲-۲): میکروگرافی از نقطه تماس کوانتومی..... ۳۱

شکل(۲-۳): نمودار روابط پاشندگی یک بعدی گاز الکترونی در حضور برهمکنش اسپین مدار راشبا

..... ۳۶

شکل(۲-٤): نمودار روابط پاشندگی یک‌بعدی گاز الکترونی در حضور برهمکنش زیمن ۳۷

شکل (۲-۵): نوسانات شوبنیکوف- دوهاس در اثر تغییرات میدان مغناطیسی..... ٤۰

شکل(۲-٦): طرحی از برهمکنش اسپین- مدار راشبا ٤۲

شکل (۲-۷): تصویری شماتیک‌وار از اسپین- فت داتا- داس..... ٤۳

شکل(٤-۱): رفتار قسمت حقیقی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در حضور برهمکنش راشبا..... ۷٤

شکل(٤-۲): رفتار قسمت موهومی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در حضور برهمکنش راشبا ۷٤

شکل(٤-۳): رفتار قسمت حقیقی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه دمای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا ۷۵

شکل(٤-٤): رفتار قسمت موهومی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه دمای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا ۷٦

شکل(٤-٥): رفتار قسمت حقیقی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه گامای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا ٧٧

شکل(٤-٦): رفتار قسمت موهومی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی برحسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه گامای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا ٧٨

شکل(٤-٧): رفتار قسمت حقیقی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه آلفای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا ٧٩

شکل(٤-٨): رفتار قسمت موهومی پذیرفتاری گاز الکترون دوبعدی بر حسب فرکانس میدان الکتریکی تابشی در سه آلفای متفاوت در حضور برهمکنش راشبا.....٨٠

چکیده

برهمکنش اسپین- مدار ناشی از نبود تقارن وارونی دیواره‌های کوانتومی در یک سیستم ناشی می‌شود. در این رساله به بررسی جامع این برهمکنش در یک گاز الکترون دوبعدی پرداخته و با به کارگیری عملگر لیوویل کوانتومی، ماتریس چگالی برای اختلال وابسته به زمان، محاسبه می‌شود. با استفاده از نتایج ماتریس چگالی محاسبه شده، پذیرفتاری الکتریکی سیستم به دست آمده است. سپس اثرات دما، قدرت راشبا و عامل اتلاف را روی پذیرفتاری الکتریکی بررسی می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قدرت راشبا فرکانس تشدید به طرف آبی جابجا خواهد شد که این جابجایی ناشی از افزایش انرژی ترازهای الکترون به خاطر برهمکنش راشبا می‌باشد. همچنین با افزایش دما اندازه قسمت‌های حقیقی و موهومی افزایش می‌یابند. با افزایش عامل اتلاف نمودارهای مربوط به قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری الکتریکی پهن‌تر می‌شوند.

کلمات کلیدی: پذیرفتاری الکتریکی، برهمکنش اسپین- مدار راشبا، ماتریس چگالی، روابط کرامرزکرونیک

پیش‌گفتار

امروزه رشد چشمگیری در اسپین‌ترونیک صورت گرفته است. وسایل الکترونیکی سنتی بر مبنای انتقال‌دهنده‌های بار الکتریکی، الکترون‌ها و در یک نیمه‌رسانا مانند سیلیکون ایجاد شده‌اند. به منظور افزایش کارایی‌های چندگانه (مانند انتقال، ذخیره و ...) در قطعات الکترونیکی نوین پژوهشگران بر آن شده‌اند که ویژگی دیگری از الکترون را به کار گیرند. این ویژگی که یک مشخصه صرفاً کوانتومی است اسپین الکترون است. چون اسپین الکترون با یک میدان مغناطیسی خارجی قابل کنترل و دستکاری است و به دلیل حافظه اسپینی نسبتاً زیاد الکترون‌ها، در تولید وسایل الکترونیکی اسپین-ترونیک اهمیت زیادی پیدا کرده است.

در رساله حاضر، ابتدا به بررسی مفاهیم مرتبط با پذیرفتاری‌الکتریکی[1] می‌پردازیم و اثر برهمکنش اسپین- مدار راشبا[2] در یک گاز الکترون[3] دو بعدی را بررسی کرده، سپس با اعمال میدان الکتریکی، پذیرفتاری الکتریکی در یک گاز الکترون دو بعدی محاسبه شده است.

ترتیب‌بندی این رساله به صورت زیر است: که ابتدا در فصل اول مفاهیم قطبش، پذیرفتاری الکتریکی، مفاهیم خطی بودن و علیت، تابع پاسخ و روابط پاشندگی و به تبع آن روابط کرامرز-کرونیک ارائه خواهد شد. سپس در فصل دوم مفهوم اسپین‌ترونیک، برهمکنش‌اسپین- مدار و به ویژه برهمکنش اسپین- مدار راشبا، دینامیک اسپین در حضور برهمکنش اسپین- مدار راشبا و اثر این برهمکنش بر گاز الکترون دو بعدی بررسی خواهد گردید. در فصل سوم به روش ماتریس چگالی و برخی از خواص آن اشاره کرده و ماتریس چگالی را به کمک عملگر لیوویل برای اختلال وابسته به

[1] Electric susceptibility
[2] rashba
[3] Electron gas

زمان به دست می‌آوریم. در فصل چهارم ابتدا در یک بررسی نظری ویژه‌حالات و ویژه‌مقادیر هامیلتونین سیستم را به دست آورده و ماتریس چگالی را تحت این ویژه‌حالات به دست می‌آوریم. سپس به کمک این ماتریس چگالی، پذیرفتاری الکتریکی گاز الکترون دوبعدی را در حضور برهمکنش اسپین- مدار راشبا و تحت تابش میدان الکتریکی محاسبه خواهیم کرد. و در قسمت آخر فصل چهارم، نتایج محاسبات با رسم نمودارهای مربوط به قسمت‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری الکتریکی ارائه شده‌اند. اثرات قدرت برهمکنش راشبا ، تغییرات دما و عامل اتلاف در نتایج به‌دست آمده بررسی شده‌اند.

فصل اول

پذیرفتاری الکتریکی

۱-۱ مقدمه

پذیرفتاری الکتریکی پاسخ محیط به میدان الکتریکی خارجی اعمالی است که به ساختار دینامیکی و میکروسکوپیکی محیط بستگی دارد. مواد خطی همسانگرد[4] و همگن پذیرفتاری الکتریکی ثابتی دارند. که از این نوع مواد برای ساختن عدسی‌ها، تارهای نوری، منشورها و لایه‌های میان صفحات خازن به منظور افزایش بار الکتریکی ذخیره شده در خازن استفاده می‌شود. پذیرفتاری الکتریکی یک کمیت مهم در فیزیک به شمار می‌آید. چون روی پدیده‌های زیادی از ظرفیت خازن گرفته تا سرعت نور تأثیر می‌گذارد. اگر محیط تحت تأثیر یک موج هماهنگ الکترومغناطیسی فرودی قرار گیرد پذیرفتاری الکتریکی با تغییرات فرکانس میدان الکتریکی اعمالی تغییر خواهد کرد و می‌تواند مقادیر حقیقی و موهومی به خود بگیرد که توسط روابط کرامرز کرونیک به هم مربوط می‌شوند. طوری‌که اگر یکی از قسمت‌های حقیقی یا موهومی برای تمام مقادیر ω معلوم باشد می‌توان دیگری را به دست آورد. شکل وقالب پذیرفتاری نسبت به فرکانس خواص پاشندگی مواد را نشان می‌دهد.

آن چه در این فصل به آن می‌پردازیم، مفهوم قطبش، پذیرفتاری الکتریکی و رابطه‌ی آن با ضریب گذردهی می‌باشد، سپس به رابطه‌ی کلاسیوس موساتی اشاره کرده و در ادامه مفاهیم خطی بودن و علیت، پاسخ فرکانسی و روابط پاشندگی و همین‌طور روابط کرامرزکرونیک بررسی خواهد شد.

[4] isotropic

۱-۲ مفهوم قطبش[5] الکتریکی در یک محیط دی‌الکتریک

وقتی یک ماده دی‌الکتریک در یک میدان الکتریکی واقع شود مولکول‌های آن تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. به طوری که میدان الکتریکی به هر ذره‌ی باردار نیرو وارد کرده و ذرات با بار مثبت در جهت میدان و ذرات با بار منفی در خلاف جهت میدان رانده می‌شوند. تحت تأثیر این عمل، قسمت‌های مثبت و منفی هر مولکول از مواضع تعادلی خود خارج شده و در دو جهت مخالف جابه‌جا می‌شوند. مقدار این جابه‌جایی به علت نیروهای قوی بازگرداننده که در اثر تغییر پیکربندی بار در مولکول به وجود می‌آید محدود است. از لحاظ ماکروسکوپیک می‌توان چنین بررسی کرد که تمام بار مثبت دی الکتریک نسبت به بار منفی جابه‌جا شده است. در این صورت گفته می‌شود که دی‌الکتریک قطبیده شده است. در واقع با قرار گرفتن ماده دی‌الکتریک در میدان الکتریکی خارجی، محیط این اختلال را با تغییر دینامیکی مواضع هسته و الکترون‌ها وفق خواهد داد. واکنش سیستم به میدان‌های خارجی شامل جریان‌های الکتریکی است که از میان سیستم جریان می‌یابد و خود باعث تولید میدان‌های الکترومغناطیس می‌شود و بنابراین تمامی ذرات سیستم درگیر می‌شوند. پس پاسخ سیستم باید به عنوان یک پدیده‌ی دسته جمعی در نظر گرفته شود. حال جریان الکتریکی تعیین می‌کند که به چه نحو میدان الکتریکی خارجی اعمال شده استتار می‌شود.

میدان القایی[6] که از جریان‌های القایی نتیجه می‌شود تمایل به مخالفت با میدان اعمالی دارد و به طور موثر باعث کاهش میدان اختلالی داخل سیستم خواهد شد. در فلزات الکترون‌ها قادرند هر میدان استاتیک الکتریکی که سیستم در معرض آن نهاده شده است را استتار کنند. در عایق‌ها این استتار محدود است. چون در این مواد بارهای الکتریکی در قید هسته‌اند و نمی‌توانند مسافت زیادی را جریان یابند.

چگالی بار با قطبش محیط تغییر می‌کند، رابطه‌ی قطبش القایی با جریان القایی به صورت زیر است:

$$\mathrm{P} = -\int_{0}^{t} \delta j\left(r,t'\right)dt' \qquad (۱-۲-۱)$$

این رابطه، قطبش را به عنوان یک کمیت ماکروسکوپیک تابع r بیان می‌کند.

اگر از طرفین رابطه‌ی بالا دیورژانس بگیریم:

[5] polarization
[6] induced

$$\nabla.\mathrm{P} = -\int_{t_0}^{t} \nabla.\delta j\,(r,t')dt' \qquad (۲-۲-۱)$$

با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی

$$\frac{\partial\rho(r,t)}{\partial t} + \nabla\cdot j\,(r,t) = 0 \qquad (۳-۲-۱)$$

خواهیم داشت

$$\nabla.\mathrm{P} = -\int_{t_0}^{t} \nabla.\delta j\,(r,t')dt' = \int_{t_0}^{t} \frac{\partial\rho(r,t')}{\partial t'}dt' = \rho(r,t) - \rho(r,t_0) \qquad (٤-۲-۱)$$

که در این رابطه چگالی القایی در t_0 صفر است.

می‌توانیم از رابطه‌ی (۱-۲-۱) نسبت به زمان مشتق بگیریم:

$$\frac{d\,\mathrm{P}\,(r,t)}{dt} = -\delta j\,(r,t) \qquad (۵-۲-۱)$$

این تعریف یک تعریف جالبی است چون در معادلات ماکسول کلاسیک از آن استفاده می‌شود که البته درخارج از ماده‌ی دی‌الکتریک طرف دوم رابطه صفر است چون در آن هیچ جریانی نمی‌تواند وجود داشته باشد.

علاوه بر این از رابطه‌ی (۱-۲-٤) به عنوان پایه‌ای برای تعریف قطبش ماکروسکوپیک القایی استفاده می‌شود.

$$\mathrm{P}_{mac}(r,t) = \frac{1}{|\Omega_r|}\int_{\Omega_r}\rho(r',t')dr' = -\frac{1}{|\Omega_r|}\int_{t_0}^{t}\int_{\Omega_r}\delta j\,(r',t')dt'dr' \qquad (٦-۲-۱)$$

Ω_r ناحیه‌ی کوچک احاطه‌کننده‌ی نقطه‌ی r است، قطر d این ناحیه در مقایسه با پارامتر شبکه a بزرگ و کوچک‌تر از طول موج[۷] میدان اعمالی است یعنی: $\lambda >> d >> a$

برای مولکول‌های قطبی که در اثر شرکت نابرابر الکترون‌های ظرفیت دارای گشتاور دوقطبی دائمی‌اند اغتشاشات گرمایی باعث می‌شود دوقطبی‌های مولکولی سمتگیری کاتوره‌ای داشته باشند. ولی با وارد کردن میدان الکتریکی دوقطبی‌ها در یک خط قرار می‌گیرند، به چنین قطبشی که در دی‌الکتریک‌های قطبی در اثر اعمال میدان پدید می‌آید قطبش سمتی گوییم.

در مورد دی‌الکتریک‌های غیرقطبی میدان اعمال شده ابرالکترونی را وامی‌پیچاند و الکترون‌ها را نسبت به هسته جابه‌جا می‌کند در نتیجه یک گشتاور دوقطبی پدید می‌آورد که به آن قطبش الکترونی می‌گوییم. علاوه بر این فرایند دیگری نیز وجود دارد که به ویژه برای مولکول‌هایی مانند بلور یونی

[7] wavelength

قابل اعمال است، در حضور میدان الکتریکی یون‌های مثبت و منفی نسبت به هم تغییر مکان پیدا می-کنند بنابراین گشتاور دوقطبی‌هایی القا می‌شود که به آن قطبش یونی یا اتمی می‌گوییم.
در رابطه‌ی (۱-۲-٦) P_{mac} همان قطبش یا گشتاور دوقطبی برایند واحد حجم است که به عنوان پاسخ محیط به میدان الکتریکی خارجی اعمالی است.
چون با اثراتی فراتر از اثرات خطی قدرت جریان القایی سروکار نداریم از این رو قطبش به عنوان پاسخ سیستم نه تنها به میدان الکتریکی خارجی، بلکه به میدان القایی که در نتیجه‌ی جریان القایی است هم، بستگی دارد. قطبش به عنوان پاسخ خطی سیستم به این میدان داده می‌شود:

$$\mathrm{P}_{mac}\left(r,t\right)=\varepsilon_0\int_{\Omega_r}\int_{t_0}^{t}\chi\left(r,t,r',t'\right).\left(\mathrm{E}_{ext}\left(r',t\right)+\mathrm{E}_{ind}\left(r',t\right)\right)dt'dr' \qquad (۷-۲-۱)$$

میدان ماکروسکوپیک E_{mac} را به عنوان متوسط میدان‌های خارجی و القایی تعریف می‌کنیم:

$$\mathrm{E}_{mac}\left(r,t\right)=\frac{1}{\left|\Omega_r\right|}\int_{\Omega_r}\left(\mathrm{E}_{ext}\left(r',t\right)+\mathrm{E}_{ind}\left(r',t\right)\right)dr' \qquad (۸-۲-۱)$$

همه‌ی سهم‌های میدان شامل منابع خارجی و منابع القایی شامل میدان ماکروسکوپیک می‌باشند پس می‌توانیم قطبش ماکروسکوپیک را به عنوان پاسخ خطی میدان ماکروسکوپیک ارائه دهیم:

$$\mathrm{P}_{mac}\left(r,t\right)=\varepsilon_0\int_{t_0}^{t}\chi\left(r,t-t'\right).\mathrm{E}_{mac}\left(r,t'\right)dt' \qquad (۹-۲-۱)$$

که برای سیستم های همگن[8] χ مستقل از مکان r است و رابطه‌ی (۱-۲-۹) به صورت $\mathrm{P}=\varepsilon_0\chi\mathrm{E}$ نوشته می‌شود که در آن χ پذیرفتاری الکتریکی ماده است که در ادامه در مورد روابط اخیر بحث خواهیم کرد.

۱-۳ پذیرفتاری الکتریکی

پذیرفتاری الکتریکی، همه‌ی اطلاعات مربوط به برهمکنش و پاسخ ماده‌ی دی‌الکتریک را نسبت به میدان الکتریکی دربردارد، در واقع نشان می‌دهد که یک ماده‌ی دی‌الکتریک چگونه در پاسخ به میدان الکتریکی قطبیده می‌شود. قطبش از طریق پذیرفتاری الکتریکی به میدان الکتریکی کل وابسته است که با رابطه‌ی زیر داده می‌شود[۱].

[8] homogeneous

$$\mathrm{P} = \varepsilon_0 \chi(r, \mathrm{E})\mathrm{E} \qquad (۱-۳-۱)$$

در رابطه ی بالا، ε_0 ثابت گذردهی خلأ و χ پذیرفتاری الکتریکی را نشان می‌دهد.
پذیرفتاری الکتریکی به ساختار میکروسکوپیکی و دینامیکی محیط بستگی دارد و چیزهایی نظیر دینامیک الکترون‌ها و اتم‌های تشکیل دهنده‌ی مواد مهم‌اند. پذیرفتاری می‌تواند به میدان E وابسته باشد در این صورت قطبیدگی تابع غیرخطی از میدان است که این معمولاً در دی‌الکتریک‌های غیر - خطی مشاهده می‌شود.
پذیرفتاری ممکن است که به موقعیت مکانی محیط بستگی داشته باشد، در این صورت محیط را ناهمگن گوییم و اگر محیط به صورت بلور باشد در این صورت قطبش نه تنها به مولفه‌ی موازی میدان بلکه به مولفه‌های دیگر هم ممکن است وابسته باشد که به چنین موادی ناهمسانگرد گوییم. مواد خطی همسانگرد و همگن پذیرفتاری الکتریکی ثابتی دارند یعنی رابطه‌ی بین قطبش و پذیرفتاری با این رابطه داده می‌شود:

$$\mathrm{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathrm{E} \qquad (۱-۳-۲)$$

که χ_e پذیرفتاری الکتریکی ثابت ماده است که از این نوع مواد برای ساختن عدسی‌ها، تارهای نوری، منشورها و لایه‌های میان صفحات خازن به منظور افزایش بار الکتریکی ذخیره شده در خازن استفاده می‌شود.

۱-٤ ضریب گذردهی و رابطه‌ی آن با پذیرفتاری

وقتی ماده‌ای تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار گیرد ضریب گذردهی[9] میزان توانایی قطبش ماده را در پاسخ به میدان نشان می‌دهد که با ε نشان می‌دهیم که در واحدهای SI بر حسب فاراد بر متر اندازه گیری می‌شود. در الکترومغناطیس میدان جابه‌جایی[10] D نشان دهنده‌ی این است که چگونه میدان الکتریکی E در آرایش بارهای الکتریکی در محیط داده شده تأثیر می‌گذارد که شامل انتقال بارها و جهت‌گیری دوباره‌ی دوقطبی‌هاست. رابطه‌ی ε در مورد یک ماده‌ی خطی، ایزوتروپیک و همگن با میدان الکتریکی E با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$D = \varepsilon E \qquad (۱-٤-۱)$$

[9] permittivity
[10] displacement field

که ε یک کمیت اسکالر است که اگر محیط ایزوتروپیک نباشد ε به دلیل شکست‌های مضاعف[11] یک تانسور [12]مرتبه‌ی دوم است. در اصل ε یک ثابت نیست چون با شرایط محیط مثل فرکانس میدان الکتریکی اعمالی، رطوبت، دما و سایر پارامترها تغییر می‌کند. در محیط‌های غیرخطی ε می‌تواند وابسته به قدرت میدان باشد به طوری که ε وابسته به فرکانس می‌تواند مقادیر حقیقی و موهومی به خود بگیرد.

اما ε_0 که ضریب گذردهی خلأ[13] نامیده می‌شود نسبت $\frac{D}{\mathrm{E}}$ در فضای آزاد است که در ثابت نیروی کولمبی هم ظاهر می‌شود. که طبق تعریف

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{{c_0}^2 \mu_0} = \frac{1}{35950207149.4727056\pi} \frac{F}{m} \approx 8.8541878176...\times 10^{-12} \frac{F}{m}$$

در این رابطه c_0 سرعت نور در فضای آزاد و μ_0 ثابت مغناطیسی[14] است.

معمولاً ضریب گذردهی خطی ماده‌ی همگن نسبت به فضای آزاد داده می‌شود که به آن ضریب گذردهی نسبی[15] ماده یا ثابت دی الکتریک نیز می‌گویند و با ε_r نشان می‌دهند:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \qquad (۱-٤-۲)$$

رابطه‌ی ضریب گذردهی با پذیرفتاری به صورت زیر است:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \chi_e\right) \qquad (۱-٤-۳)$$

اگر رابطه‌ی بین پذیرفتاری را با ضریب گذردهی نسبی بنویسیم:

$$\chi_e = \varepsilon_r - 1 \qquad (۱-٤-٤)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱-٤-٤) در خلأ خواهیم داشت: $\chi_e = 0$

با توجه به روابط اخیر رابطه‌ی جابه‌جایی الکتریکی با پذیرفتاری و ضریب گذردهی نسبی را می‌توان به این صورت نوشت:

$$D = \varepsilon_0 \mathrm{E} + P = \varepsilon_0 \left(1 + \chi_e\right) \mathrm{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathrm{E} \qquad (۱-٤-۵)$$

[11] birefringence
[12] tensor
[13] vacuum permittivity
[14] magnetic constant.
[15] relative permittivity

از نظر تجاری تولید خازن‌ها، خصوصاً خازن‌هایی که از یک ماده‌ی دی‌الکتریک با ضریب گذردهی بالا ساخته می‌شوند، با اهمیت است که در طی این عمل، خازن بارهای مثبت و منفی را ذخیره می‌کند. از مزیت‌های آشکار استفاده از مواد دی‌الکتریک این است که از تماس سریع و مستقیم بارهایی که روی صفحات هادی ذخیره می‌شود جلوگیری می‌کند. ضریب گذردهی بالا اجازه می‌دهد که در یک ولتاژ داده شده بار زیادتری ذخیره شود که می‌توانیم در یک دی‌الکتریک خطی با ضریب گذردهی بالا و ضخامت d بین دو صفحه‌ی هادی آن و با چگالی بار یکسان، افزایش بار ذخیره شده را مشاهده کنیم. چگالی بار σ با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\sigma = \varepsilon \frac{v}{d} \qquad (۱-٤-٦)$$

برای ظرفیت واحد سطح خازن خواهیم داشت:

$$C = \frac{\sigma\varepsilon}{v} = \frac{\varepsilon}{d} \qquad (۱-٤-۷)$$

با نگاهی به این رابطه می‌توان به راحتی فهمید که ضریب گذردهی بالا منجر به ذخیره‌ی بار زیاد و افزایش ظرفیت خازن می‌شود که معمولاً در برابر یونیزاسیون مقاوم هستند. این به خازن‌ها اجازه می‌دهد تا در ولتاژهای بالا کار کنند، قبل از این که دی الکتریک یونیزه شود و یک جریان ناخواسته جاری شود.

از طرفی ε و μ محیط، طبق رابطه‌ی $\mu\varepsilon = \frac{1}{C^2}$ تعیین کننده‌ی سرعت فاز تابش الکترومغناطیس محیط است که این نشان می‌دهد که پذیرفتاری الکتریکی روی پدیده‌های زیادی از ظرفیت خازن گرفته تا سرعت نور تأثیر می‌گذارد.

۱- ۵ رابطه‌ی کلاسیوس موساتی[16]

رابطه‌ی P_m با E_{mac} در یک سیستم، اغلب با یک مدل دو قطبی گسسته‌ی ساده در نظر گرفته می‌شود بنابراین سیستم به صورت جمع المان‌های جایگزیده تجزیه می‌شود. اگر عناصر تشکیل دهنده همه بار خنثی داشته باشند و قطبش‌پذیری آنها مستقلانه موجود باشد، هیچ مشکل اساسی برای استخراج رابطه‌ی (۱-۲-۹) وجود نخواهد داشت.

[16] Clausius-Mossotti relation