

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

بررسی خواص الکتریکی میکروساختار ایجادشده بر سطح

سیلیکون توسط لیزر اگزایمر ArF در مجاورت گاز SF₆ با استفاده

از روش EIS

استاد راهنما:

آقای دکتر حمیدرضا دهقانپور

نگارنده:

الناز کشاورز صفی

بهمن ۱۳۹۱

قطره‌ای بیش نیست

تقدیم به پدر و مادرم

پادشاهت یک عمر فداکاری

تقدیم به همسر مهربانم

که بیش از همه با محبت‌های سیکرانش،

درفراگیری درس بردباری بر مرارت‌های پیش رویم یاری ام کرد و در همه حال یار و یاور من بوده و هست و

من ناتوان از قدردانی ام، جبران آن را از پروردگارم خواستارم.

سایکزاری

در هیاهوی زندگی دریافتم چه دویدن هائی که فقط پایم را از من گرفت در حالی که گویی ایستاده بودم، چه غصه هائی که فقط باعث سپیدی موهایم شد در حالی که قصه ای کو دکانه میش نبود. دریافتم کسی هست که اگر بخواید می شود و اگر نه نمی شود. به همین سادگی "کاش نه می دویدم و نه غصه می خوردم فقط اورامی خواندم.

گرچه در ابتدای این راه بی پایان، ستم ولی امیدوارم که با دستیابی به مراتب بالاتر، علاوه بر شکر از خالق یکتا؛ از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حمید رضا دهقانپور از آنجا که تجلیل از معلم پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تائین می کند، بر حسب وظیفه و از باب این که تقدیر و شکر از نعمت های خداوند همانند شکر از اوست؛ و از بهیسی دوستان همیشه سرسبز و پابنده ام، و در آخر از پدر و مادر و دوست بزرگ و بیچگاه تکرار نشدنی و دست نیافتنی و نیز همسر مهربانم؛ کسانی که از لحظه ای منت نهادن امتناع کردند و عاشقانه و بی چشمداشت مرادوست داشتند و یاری کردند؛ گوشه ای از مراتب ادب و تواضع را با تقدیم این پیام نامه به ایشان به جای آوردم.

چکیده:

سیلیکون یکی از مهم ترین مواد نیمه رسانا است که در مورد آن تحقیقات بسیار زیادی صورت گرفته و در حال حاضر نیز در حال انجام است. یکی از موضوعات جالب در این خصوص تغییر خصوصیات سطحی سیلیکون به منظور بدست آوردن کاربرد های متفاوت از این ماده است. در این راه ایجاد میکروساختار منظم بر سطح سیلیکون با استفاده از لیزر در حضور گازهای هالوژن دار از موضوعات مطرح شده در سال های اخیر است. در این کار ما با استفاده از نتایج تجربی تکنیک EIS (اسپکتروسکوپی امپدانس الکتریکی) بر روی میکروساختار ایجاد شده بر سطح سیلیکون با لیزر اگزایمر ArF در مجاورت گاز SF_6 در فشارهای مختلف و بر اساس نظریه ی موجود خواص مهمی از این میکروساختار از قبیل زمان واهلش حامل ها، تحرک پذیری و ضریب انتشار انیشتین را بدست آورده ایم.

کلمات کلیدی: میکروساختار سیلیکون، طیف سنجی امپدانس الکتریکی، لیزر اگزایمر ArF ، گاز SF_6

فهرست مطالب

فهرست شکل ها	۵
فصل اول: پیشگفتار و مبانی نظری	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ آزمایش و تجربه ی طیف سنجی اساسی امپدانس:	۲
۳-۱ پاسخ به یک محرک سیگنال کوچک در حوزه فرکانس:	۵
۴-۱ توابع مرتبط با امپدانس:	۸
۵-۱ تاریخچه اولیه:	۹
۶-۱ فایده ها و محدودیت ها:	۱۰
۷-۱ آنالیز بنیادی طیف های امپدانس:	۱۵
۱-۷-۱ مدل های فیزیکی برای عناصر مدار معادل:	۱۵
۸-۱ کاربردهای انتخاب شده از IS:	۱۶
۹-۱ آنالیزورهای طیف:	۲۲
۱۰-۱ مهاجرت در غیاب گرادیان غلظت:	۲۴
۱۱-۱ سیستم های اندازه گیری امپدانس الکتروشیمیایی:	۲۷
۱-۱۱-۱ پیکر بندی سیستم:	۲۷
۲-۱۱-۱ اندازه گیری ها با استفاده از تکنیک های ۲، ۳، ۴ یا پایانه:	۲۷
۱۲-۱ سیستم های اندازه گیری امپدانس مواد:	۲۹
۱-۱۲-۱ پیکر بندی سیستم:	۲۹
۲-۱۲-۱ اندازه گیری مواد امپدانسی پایین:	۳۰
۳-۱۲-۱ اندازه گیری مواد امپدانسی بالا:	۳۰
فصل دوم: پیشینه ی کار	۳۱
فصل سوم: بررسی ایجاد میکروساختار منظم بر سطح سیلیکون توسط لیزر اگزایمر ArF در مجاورت گاز SF ₆ و اندازه گیری خصوصیات ظرفیتی و مقاومتی لایه ی ایجاد شده با استفاده از روش EIS	۳۸

۳۸	۱-۳ مقدمه
۴۱	۲-۳ دستگاه :
۴۲	۳-۳ نتایج و بحث :
۴۶	فصل چهارم: بررسی چگونگی انجام EIS در خصوص میکروساختار سیلیکونی
۴۶	۱-۴ مقدمه
۴۶	۲-۴ مدل های میکروساختاری :
۴۷	۱-۲-۴ مدل لایه ای:
۵۴	فصل پنجم: نتایج EIS برای میکروساختار سیلیکونی و بررسی نظری آن ها
۵۴	۱-۵ مقدمه :
۵۷	۲-۵ دیود های شاتکی:
۵۹	۳-۵ ناهمواری سطح :
۶۳	۴-۵ رسانایی های ac و dc :
۶۴	۱-۴-۵ بدست آوردن زمان واهلش حامل در لایه ی میکروساختاری:
۷۰	۲-۴-۵ بدست آوردن ضریب انتشار در لایه ی میکروساختاری:
۷۲	۳-۴-۵ بدست آوردن عامل تحرک حامل های اکثریتی در لایه ی میکروساختاری:
۷۴	۵-۵ ظرفیت خازنی :
۷۷	نتیجه گیری :
۷۸	پیشنهادها:
۷۹	فهرست منابع :

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: امپدانس Z رسم شده به عنوان یک بردار مسطح با استفاده از مختصات قطبی و راست گوشه ۷
- شکل ۲-۱: نمودار روند اندازه گیری و مشخصه ی یک سیستم الکترو-د ماده ۱۱
- شکل ۳-۱: مثالی از مدارهای مختلف با امپدانس کلی یکسان در همه ی فرکانس ها ۱۲
- شکل ۴-۱: مثالی دیگر از مدارهای مختلف با امپدانس کلی یکسان در همه ی فرکانس ها ۱۳
- شکل ۵-۱: سه مدار که می توانند امپدانس یکسانی را در همه ی فرکانس ها داشته باشند ۱۴
- شکل ۶-۱: نتایج امپدانسی یک جفت $Zn(Hg)/Zn^{+2}$ در $10^{-3} M HClO_4 + 1 M NaClO_4$ ۱۷
- شکل ۷-۱: نتایج امپدانسی جفت Hg/Hg^{+2} در $1 M HClO_4$ ۱۹
- شکل ۸-۱: رفتار هدایت ظاهری سلول الکتروشیمیایی برای یک نمونه با الکترودهای متخلخل و مدار معادل آن ۲۱
- شکل ۹-۱: آنالیزورهای طیف ۲۳
- شکل ۱۰-۱: وابستگی فرکانسی رسانایی جهنده برای نمودارهای انرژی پتانسیلی مختلف ۲۵
- شکل ۱۱-۱: مدار معادلی که نشاندهنده ی رفتار ماده ای است که هر دو فرآیند قابلیت رسانایی رنج بلند (σ) و تعدادی از فرآیندهای واهلش مجزا را دارد ۲۶
- شکل ۱۲-۱: تکنیک های اندازه گیری ۲ پایانه ای و ۴ پایانه ای ۲۸
- شکل ۱-۳: طرح واره ی آزمایشی دستگاه پرتو افکنی ۴۱
- شکل ۲-۳: روند ایجاد میکروساختار بر سطح سیلیکون تحت دزهای تابشی ۴۳
- شکل ۳-۳: روند ایجاد میکروساختار بر سطح سیلیکون تحت فشارهای گاز SF_6 ۴۴
- شکل ۴-۳: ارتفاع متوسط مخروط ها بر حسب فشار ۴۴
- شکل ۵-۳: ارتفاع متوسط مخروط ها بر حسب دز UV ۴۵
- شکل ۱-۴: مدار معادل یک میکروساختار دو فازی ۴۷
- شکل ۲-۴: میکروساختارهای دو فازی فرضی شرح داده شده توسط مدل لایه ای ساده ۴۷
- شکل ۳-۴: مدار معادل از مدل لایه ای موازی. دو عنصر ویت متصل شده به طور موازی ۴۸
- شکل ۴-۴: (آ) نمودار طرح واره از EIS و (ب) مدل الکتریکی معادل برای Si تابش شده ۴۹

- شکل ۴-۵: (آ) مدار متداول در IS، (ب) واکنش صفحه ی مختلط Z و (پ) واکنش صفحه ی مختلط Y..... ۵۰
- شکل ۵-۱: (آ) رسانایی و (ب) ظرفیت خازنی بر حسب فرکانس بدست آمده توسط EIS..... ۵۵
- شکل ۵-۲: انعکاس از سطح سیلیکون میکروساختاری در فشار های مختلف ۵۷
- شکل ۵-۳: تغییرات چگالی حالات سطح مشترک، N_{SS} ، برای دیود به عنوان تابعی از فرکانس در دمای اتاق ۵۸
- شکل ۵-۴: وابستگی فرکانسی نمودار ولتاژ - ظرفیت خازنی دیود ۵۸
- شکل ۵-۵: شکل های هندسی پیشنهاد شده برای شبیه سازی ۶۰
- شکل ۵-۶: ظرفیت خازنی هر واحد سطح ($F Cm^{-2}$) بر حسب ناهمواری سطح ۶۰
- شکل ۵-۷: تصویر SEM از ترکیبات کربن دار ۶۱
- شکل ۵-۸: مقادیر ظرفیت خازنی در برابر سطح برای ضخامت های معین ۶۲
- شکل ۵-۹: نمودارهای رسانایی به عنوان تابعی از فرکانس ۶۳
- شکل ۵-۱۰: نمودارهای رسانایی بر حسب زمان واهلش ۶۹
- شکل ۵-۱۱: نمودارهای ضریب انتشار بر حسب فرکانس ۷۱
- شکل ۵-۱۲: نمودارهای رسانایی بر حسب تحرک پذیری ۷۳
- شکل ۵-۱۳: واکنش فرکانسی سنسور در ۱۵۰ ppmV ۷۴
- شکل ۵-۱۴: مشخصه های رسانایی ac و ظرفیت خازنی محاسبه شده در دماهای مختلف ۷۵

فصل اول

پیشگفتار و مبانی نظری

۱-۱ مقدمه:

از زمان پایان جنگ جهانی دوم، ما شاهد باتری های حالت جامد به عنوان وسایل ذخیره انرژی با قدرت و چگالی بالا که قابلیت دوباره شارژ شدن دارند، همچنین حرکت و چرخشی در گیرنده های حسی الکتروشمیایی با درجه حرارت بالا در کنترل بازده انرژی، کنترل صنعتی و کنترل محیطی و نیز معرفی سلولهای سوختی برای اجتناب از بازدهی کم در تبدیل و تغییر انرژی بودیم.

برای آسودگی در بررسی حجم توده، در مهندسی الکتروشمیایی گرایش دوری از محلولهای آبی خورنده و گرایش جذب به سوی تکنولوژی حالت جامد، ناگزیر و حتمی بود. بعنوان یک نتیجه، توصیف سیستم هایی با سطح مشترک های جامد-مایع یا جامد-جامد، که اغلب شامل رساناهای یونی جامد و عملیات مکرری در دمای بالاتر از دمای اتاق هستند یک نگرانی بزرگ برای دانشمندان مواد و الکتروشمیدانها شدند.

بر روی یک سطح مشترک، خصوصیات فیزیکی، بلورشناسی، مکانیکی و مخصوصاً تغییر شتاب و پخش بار به صورت ناهمگن (ایجاد قطبش)، کل هدایت الکتریکی یک سیستم را کاهش می دهد. ازدیاد و تکثیر سطح مشترک یک ویژگی تشخیص سلولهای الکتریکی حالت جامد است، سلول هایی که در آنها نه فقط نقطه اتصال بین الکتروود و الکترولیت به طور قابل توجهی پیچیده تر از داخل سلولهای آبی است، بلکه همچنین الکترولیت جامد به طور عادی چند بلوری است. وقتی سیستم در معرض اختلاف پتانسیل کاربردی قرار می گیرد هر سطح مشترکی در راه مخصوص خودش قطبش داده خواهد شد.

وقتی ولتاژ کاربردی مطابق مشخصات نوع سطح مشترک معکوس شود، میزان سرعت در منطقه پلاریزه به این صورت تغییر خواهد کرد: برای واکنشهای شیمیایی در محل اتصال فاز سه گانه بین اتمسفر، الکتروود و الکترولیت آرام می شود، و در سرتاسر مرزهای بلوری در الکترولیت چند بلوری به مقدار قابل محسوسی تندتر می شود.

تأکید در الکتروشیمیایی نتیجتاً انتقال و شیفتی از وابستگی غلظت - زمان به سوی پدیده‌های مرتبط با فرکانس دارد، یعنی گرایشی به سمت مطالعات ac سیگنال کوچک. جفت لایه های الکتریکی و مقاومت خازنی ذاتی شان توسط زمانهای واهلششان ویا بطور واقع بینانه تر توسط توزیع و پخش زمانهای واهلششان توصیف شده‌اند. تغییرات واکنش الکتریکی سلول ناهمگن به طور اساسی به نوع بار حاضر، ساختمان میکروسکوپی الکترولیت و بافت و طبیعت الکترودها بستگی دارد.

طیف بینی مقاومت ظاهری امپدانس^۱ (IS) یک روش نسبتاً قوی و جدید برای توصیف تعدادی از خصوصیات الکتریکی مواد و فصل مشترک های آنها با الکترودهای رسانای الکترونیکی است. IS می تواند برای بررسی حرکت بار متحرک یا ساکن در حجم و یا در مناطق سطح مشترک از هر نوع مواد جامد یا مایع از قبیل یونی، نیمه رسانا، ترکیب یونی- الکترونی و حتی عایق ها استفاده شود.

ما باید به سلول آزمایشی به عنوان یک سیستم الکتروود - ماده بنگریم. اگرچه باید روی رساناهای ذاتی تمرکز کنیم اما بیشتر تکنیک های اندازه گیری IS، روش های ارائه و نمایش داده ها و توابع آنالیز بحث شده در این باره به طور مستقیم برای مواد دی الکتریک پر اتلاف به کار می روند.

۱-۲ آزمایش و تجربه ی طیف سنجی اساسی امپدانس:

اندازه گیری های الکتریکی برای ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی الکتروود یا مواد الکترولیت معمولاً توسط سلولهایی که در آنها دو الکتروود در مقابل یک نمونه به شکل حجم متوازی السطوح مستطیلی یا استوانه ای قرار می گیرند، انجام می شود. هرچند، اگر دستگاههایی مانند سنسورهای شیمیایی یا سلول های زنده در حال بررسی اند، اما این نمونه متقارن هندسی اغلب غیرممکن است.

خلاً، یک فضای خنثی مانند آرگون یا یک فضای اکسایشی هرکدام کاربردهای مختلفی دارند. دستاورد کلی شامل به کار بردن یک محرک الکتریکی (یک جریان یا یک ولتاژ مشخص) به الکترودها و مشاهده واکنش (جریان یا ولتاژ حاصل) است.

^۱ Impedance Spectroscopy

بطور واقعی همیشه فرض شده است که خصوصیات سیستم ماده - الکتروود ناوردای زمانی باشند، و یکی از هدف های اصلی IS تعیین کردن این خصوصیات است، از جمله وابستگی آنها به یکدیگر، وابستگیشان به متغیرهای قابل کنترلی مانند دما، فشار جزئی اکسیژن، فشار هیدرواستاتیک کاربردی و ولتاژ ایستایی کاربردی.

وقتی سلول تحریک الکتریکی شده است گروهی از فرایندهای میکروسکوپی بنیادی در سرتاسر سلول اتفاق می افتد و بطور هماهنگ به واکنش الکتریکی کلی منجر می شود. این مراحل شامل انتقال الکترون ها در سرتاسر رساناهای الکترونیکی، انتقال الکترون ها در سطح مشترک های الکتروود-الکتروولیت به، یا از، گونه های اتمی باردار شده یا باردار نشده ای که از مواد سلول و محیط اتمسفری خودشان سرچشمه می گیرند (اکسیداسیون یا واکنش کاهش)، و شار اتم های باردار شده و همجوشی اتم ها از طریق نقایص موجود در الکتروولیت است.

میزان و سرعت شار ذرات باردار شده (جریان) به مقاومت اهمی الکتروودها و الکتروولیت و همچنین میزان واکنش در سطح مشترک های الکتروود - الکتروولیت بستگی دارد. شار ممکن است بیشتر توسط ناهنجاری های ساختار باند در مرزهای بلوری و یا توسط نقص های نقطه ای موجود در حجم کل مواد متوقف شود. ما باید همیشه فرض کنیم که سطح مشترک های الکتروود - الکتروولیت کاملاً صاف و هموارند، با یک جهت گیری بلورشناسی ساده. البته، در واقع آن ها دنداندارند، پراز نقص های ساختاری، مدارهای باز و مدارهای کوتاه الکتریکی هستند. آن ها اغلب شامل گونه های شیمیایی خارجی هستند که روی میدان الکتریکی محلی تأثیر می گذارند.

سه نوع مختلف از تحریک های الکتریکی که در IS استفاده میشوند وجود دارد:

تکنیک اول، در اندازه گیری های گذرای یک تابع پله ای از ولتاژ

$$(V(t) = V_0 \text{ for } t > 0, V(t) = 0 \text{ for } t < 0) \quad (1-1)$$

می تواند در زمان $t = 0$ به سیستم اعمال شود و در نتیجه جریان متغیر با زمان $i(t)$ اندازه گیری شود.

نسبت $V_0/i(t)$ اغلب مقاومت متغیر با زمان یا امپدانس اندیسی نامیده می شود و امپدانس ناشی از اختلال تابع پله ای ولتاژ در سطح مشترک الکتروشیمیایی را اندازه گیری می کند. اگرچه این کمیت به آسانی تعریف شده، اما در IS به آن رجوع نمی شود، بلکه چنین نتایج متغیر با زمانی بطور کلی تبدیل فوریه ای یا لاپلاسی به حوزه فرکانس می شوند، و محصول یک امپدانس وابسته به فرکانس است. این تحول تنها زمانی معتبر است که $|V_0|$ به اندازه کافی کوچک باشد که در این حالت پاسخ سیستم خطی است.

از مزایای این دستاورد این است که به طور تجربی به آسانی انجام شده و اینکه متغیر مستقل، یعنی ولتاژ، سرعت واکنش های الکتروشیمیایی در سطح مشترک را کنترل می کند.

از معایب آن نیاز به انجام تبدیل انتگرالی از نتایج است و این حقیقت که نسبت سیگنال به نویز در بین سیگنال های مختلف متفاوت است، بنابراین امیدانس ممکن است در همه رنج های فرکانسی خواسته شده به خوبی تعیین نشده باشد.

تکنیک دوم، اعمال یک سیگنال $v(t)$ تشکیل شده از نویز تصادفی (نور سفید) به سطح مشترک و اندازه گیری جریان حاصل است. دوباره، یک تبدیل فوریه کلی نتایج برای رفتن به داخل حوزه فرکانسی و بدست آوردن یک امیدانس لازم است.

مزیت این دستاورد، جمع آوری داده های سرعت است و از معایب آن، نیاز به نور سفید واقعی و سپس نیاز به انجام آنالیز فوریه است. اغلب یک میکروکامپیوتر هم برای تولید نویز سفید وهم تجزیه و تحلیل پس از آن مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از مجموع امواج سینوسی به عنوان تحریک به جای نویز سفید، مزیت یک نسبت سیگنال به نویز بهتر برای هر فرکانس خواسته شده و نیز توانایی تجزیه و تحلیل خطی واکنش سیستم را ارائه می دهد.

تکنیک سوم یکی از رایج ترین و استاندارد ترین روش ها برای اندازه گیری امیدانس توسط اعمال یک جریان یا ولتاژ تک فرکانس به سطح مشترک و اندازه گیری شیفیت دامنه و فاز، یا بخش های حقیقی و موهومی جریان حاصل در آن فرکانس، است. ابزار بازرگانی و تجاری در دسترس اند تا امیدانس را به عنوان تابعی از فرکانس به صورت خودکار در رنج فرکانسی حدود 1mHz تا 1MHz اندازه بگیرند و به راحتی به میکروکامپیوترهای آزمایشگاهی مرتبط شده اند.

از مزایای این رویکرد قابلیت در دسترس بودن این ابزار و سهولت استفاده از آن هاست و همچنین این واقعیت که تجربی کار می تواند نسبت سیگنال به نویز بهتری در رنج فرکانسی مفیدتری بدست آورد.

علاوه بر این سه رویکرد، همچنین می توان آن ها را با انواع کلی دیگری از محرک ها ترکیب کرد. مهمترین این محرک ها، قطبش سنج ac است که تکنیک های اول و سوم را با به کارگیری همزمان یک سیگنال گذرای تک قطبی متغیر خطی، و یک سیگنال سینوسی تک فرکانس کوچکتر ترکیب می کند. به طور کلی هر خاصیت ذاتی که رسانایی یک سیستم الکتروود - ماده را تحت تأثیر قرار می دهد، یا یک محرک خارجی، می تواند توسط IS مورد مطالعه قرار بگیرد. پارامترهای بدست آمده از یک طیف IS به طور کلی در دو دسته قرار می گیرند:

(آ) آن هایی که فقط به خود ماده مربوط اند، مانند رسانایی، ثابت دی الکتریک، انتقال بارها، غلظت تعادل گونه های باردار شده و سرعت و میزان ترکیب شدن دوباره برای تولید حجم.

(ب) آن هایی که به سطح مشترک الکتروود - ماده مربوط اند، مانند ثابت های سرعت واکنش - جذب سطحی، ظرفیت خازنی ناحیه سطح مشترک و ضریب انتشار گونه های خنثی در خود الکتروود. تعجب آور نیست که پیشرفت های مدرن در اتوماسیون الکترونیکی در IS گنجانده شده است.

۳-۱ پاسخ به یک محرک سیگنال کوچک در حوزه فرکانس:

یک سیگنال تک رنگ $v(t) = v_m \sin(\omega t)$ ، شامل فرکانس $\omega / 2\pi$ ، به یک سلول اعمال شده و در نتیجه جریان ثابت یکنواخت $i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta)$ اندازه گیری می شود.

θ در این جا اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان است و برای رفتارهای صرفاً مقاومتی برابر صفر است. در حالت کلی حل یک سیستم، نیازمند معادلات دیفرانسیلی است. پاسخ عناصر خازنی و القایی بطور متناظر به صورت $i(t) = [dv(t)/dt] C$ و $v(t) = [di(t)/dt] L$ داده می شود، و ترکیب بسیاری از چنین عناصر می تواند یک مشکل پیچیده حل نشدنی ایجاد کند. خوشبختانه استفاده از تبدیل فوریه اجازه میدهد تا به صورت قابل توجهی معادلات ریاضی این سیستم ساده شود.

معادلات دیفرانسیلی بالا می توانند به صورت $I(j\omega) = V(j\omega)/(L \cdot \omega \cdot j)$ و $I(j\omega) = C \cdot \omega \cdot j \cdot V(j\omega)$

تبدیل شوند. در اینجا $j = \sqrt{-1}$ است که اغلب به صورت "i" نوشته می شود. به آسانی می توان دید که در حوزه فرکانس، روابط جریان/ولتاژ می توانند به شکلی شبیه به قانون اهم برای جریان dc بازآرایی شوند:

$$I(j\omega) = V(j\omega)/Z(j\omega) \quad (۲-۱)$$

که مطابق روابط ذکر شده، کمیت مختلط $Z(j\omega)$ برای ظرفیت خازنی برابر $\frac{1}{(C \cdot \omega \cdot j)}$ و برای ظرفیت القایی برابر $L \cdot \omega \cdot j$ است.

کمیت مختلط $Z(j\omega)$ بعنوان تابع امپدانس تعریف شده و مقدارش در یک فرکانس خاص، امپدانس جریان الکتریکی است؛ برای سادگی این کمیت معمولاً فقط $Z(\omega)$ نوشته می شود.

به دلیل این روابط قانون اهم مانند، بین ولتاژ و جریان مختلط، امپدانس یک مدار با عناصر مختلف با استفاده از قوانین مشابه با مقاومت های چندگانه محاسبه شده است. امپدانس می تواند نه تنها برای سیستم های گسسته بلکه برای سیستم های توزیع شده اختیاری نیز به صورت تبدیلات فوریه معادله دیفرانسیلی تعریف ولتاژ واکنش تقسیم بر تبدیلات فوریه تحریک جریان تناوبی تعریف شده باشد؛

$$Z(j\omega) = F\{v(t)\}/F\{i(t)\} \quad (۳-۱) \quad \text{یعنی:}$$

در این جا اپراتور $\{F\}$ نشاندهنده یک تبدیل فوریه است. با این حال، تبدیل فوریه فقط معادلات دیفرانسیلی را تحت شرایط خطی بودن، علیت و حالت مانای سیستم به شکل قانون اهم مانند ساده تبدیل می کند؛ بنابراین امپدانس به طور مناسب فقط برای سیستم هایی که در این شرایط صدق می کنند تعریف شده است.

مفهوم امپدانس الکتریکی اولین بار توسط الیور هیویساید^۲ معرفی شد و سپس بعد از توسعه عبارات نمودارهای برداری و مختلط، دوباره توسط کنلی^۳ معرفی و ارائه شد.

امپدانس نسبت به مقاومت یک مفهوم کلی تر است؛ زیرا اختلاف فاز را به حساب می آورد و یک مفهوم ضروری و بنیادی در مهندسی برق می شود. اندازه و جهت بردار دو وجهی (مسطح) در یک سیستم متعامد دست راست از محورها می تواند توسط بردار مجموع مؤلفه های a و b در امتداد محورها نشان داده شود، یعنی توسط عدد مختلط $Z = a + jb$.

عدد موهومی $j = \sqrt{-1} = \exp(j\pi/2)$ ، چرخشی خلاف جهت ساعت به اندازه $\pi/2$ نسبت به محور X را نشان می دهد. بنابراین بخش حقیقی Z یعنی a ، در جهت محور حقیقی X و قسمت موهومی Z یعنی b ، در راستای محور Y است. یک امپدانس به صورت $Z(\omega) = Z' + jZ''$ چنین کمیت برداری است و، همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، می تواند در صفحه با هردو مختصات قطبی و یا راست گوشه رسم شود.

در اینجا دو مقدار مختصات راست گوشه بطور واضح برابرند با:

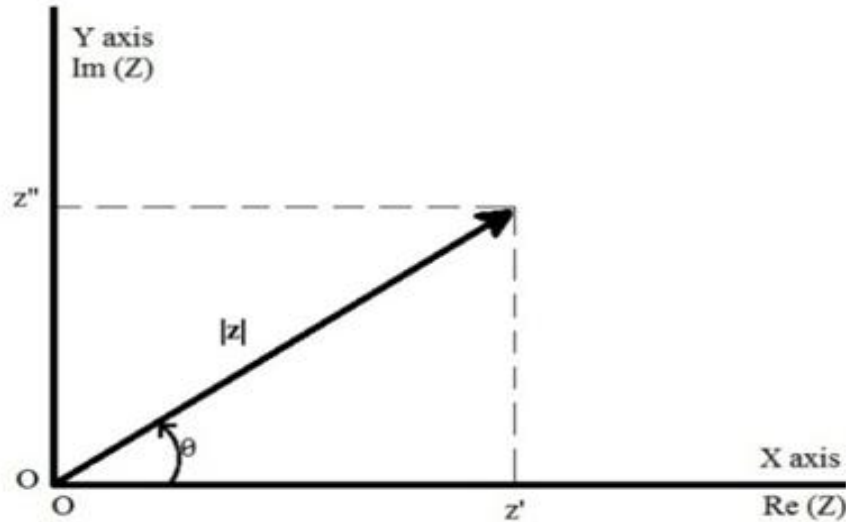
$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin(\theta) \quad \text{و} \quad \text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos(\theta)$$

$$\theta = \tan^{-1}(Z''/Z') \quad \text{با زاویه فاز}$$

$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad \text{و مدول}$$

^۲ Oliver Heaviside

^۳ A.E.Kennelly



شکل ۱-۱: امپدانس Z رسم شده به عنوان یک بردار مسطح با استفاده از مختصات قطبی و راست گوشه [۱]

این نمودار، صفحه مختلط را تعریف می کند که بطور وسیعی در مهندسی برق و در ریاضیات استفاده می شود. در فرم قطبی، امپدانس Z به صورت $Z(\omega) = |Z| \exp(j\theta)$ نوشته می شود، که میتواند با استفاده از نسبت اولر $\exp(j\theta) = \cos(\theta) + j \sin(\theta)$ ، به فرم راست گوشه برگردانده شود.

باید توجه شود که تغییرات زمان اصلی از جریان حاصل و ولتاژ به کار برده شده حذف شده است و امپدانس ثابت زمان است (مشروط به اینکه سیستم خودش ثابت زمان باشد). در حالت کلی Z ، تابع فرکانس است و همانطور که در قبل نشان داده شد، بطور قراردادی IS شامل اندازه گیری Z بعنوان تابعی از ω یا ν در سراسر یک رنج فرکانسی پهن است. ω پاسخی است که از اطلاعات درباره ویژگی های الکتریکی سیستم الکتروود - ماده کامل ناشی می شود.

برای سیستم های غیرخطی، مانند بیشتر سیستم های الکتروود - ماده واقعی، IS در هر دو حوزه ی فرکانس یا زمان اندازه گیری می کند که در حالت کلی فقط برای سیگنال های بزرگی که در سراسر سیستم الکتروود - ماده، واکنش سیستم از لحاظ الکتریکی خطی است، مفید و پر معنی هستند.

هم سیستم های الکتروشیمیایی مایع و هم جامد تمایل به نشان دادن رفتار غیر خطی قوی دارند، مخصوصاً در واکنش سطح مشترک آن ها، وقتی که ولتاژها یا جریان های اعمال شده بزرگ اند.

اما تازمانی که دامنه ی اختلاف پتانسیل اعمال شده V_m از ولتاژ حرارتی V_T که برابر است با $V_T \equiv RT/F \equiv KT/e$ ، کمتر باشد، سیستم به صورت خطی واکنش خواهد داد.

در این تعریف؛ K ثابت بولتزمن، T دمای جذب، e بار پروتون، R ثابت گازها و F ثابت فارادی است.

۱-۴ توابع مرتبط با امپدانس:

امپدانس مکرراً بعنوان امپدانس ac یا امپدانس پیچیده در نظر گرفته شده است. امپدانس بدون تعدیل کننده همیشه به معنی استفاده از امپدانس در حوزه فرکانس است و معمولاً با یک سیگنال تک رنگ اندازه گیری شده است. حتی زمانی که مقادیر امپدانس توسط تبدیل فوریه از حوزه زمان مشتق شده باشند، اما هنوز هم امپدانس برای مجموعه ای از فرکانس های جزئی تعریف شده است و در نتیجه امپدانس در توصیف ویژگی، یک جریان متناوب است.

امپدانس تعریف یک کمیت مختلط است و تنها وقتی حقیقی است که $\theta=0$ باشد، یعنی برای رفتارهای صرفاً مقاومتی، که در این صورت تابع امپدانس برابر $Z(\omega) = Z'(\omega)$ است. در این حالت امپدانس کاملاً از فرکانس مستقل است. تنها زمانی که $Z(\omega) = Z'$ و مستقل از فرکانس باشد، در این صورت $Z' = R$ ، که R مقاومت خطی معمولی و $Z(\omega)$ کاملاً حقیقی است.

چند کمیت اندازه گیری شده در ارتباط با مقاومت ظاهری امپدانس وجود دارد که نقش مهمی را در IS بازی می کنند و به طور عمومی ایمیتانس^۴ نامیده می شوند.

کمیت اول هدایت ظاهری یا ادمیتانس^۵ است که به صورت $Y \equiv Z^{-1} \equiv y' + jy''$ تعریف می شود. در حوزه مختلط، یعنی جایی که v ، i و Z مختلط فرض شده اند، می توان نوشت: $v = Zi$ یا بطور متناوب $i = Yv$. همچنین در IS بیان کردن Z و Y به صورت عبارت هایی از مؤلفه های ظرفیت خازنی و مقاومتی مرسوم است، که عبارتند از:

$$Y = G_p(\omega) + jB_p(\omega) \quad \text{و} \quad Z = R_s(\omega) - jX_s(\omega)$$

در اینجا مقاومت ظاهری برابر $X_s = [\omega C_s(\omega)]^{-1}$ و هدایت القایی برابر $B_p \equiv \omega C_p(\omega)$ است.

اندیس های s و p بیانگر حالت های سری و موازی است. دو کمیت دیگر معمولاً بعنوان تابع مدول با رابطه $M = j\omega C_C Z = M' + jM''$ و ثابت دی الکتریک مختلط یا گذردهی دی الکتریک با رابطه $\epsilon = M^{-1} \equiv Y / (j\omega C_C) \equiv \epsilon' - j\epsilon''$ تعریف شده اند.

در این بیان $C_C = \epsilon^{\circ} A^{\circ} / l$ ظرفیت خازنی سلول اندازه گیری و l طول جداسازی الکترودها است.

^۴ Immittance

^۵ Admittance

کمیت ϵ_0 یا گذردهی الکتریکی از فضای آزاد برابر است با $F/m \cdot 10^{-12} \times 8/854$. ثابت دی الکتریک ϵ اغلب در جاهای دیگر برای نشان دادن ماهیت مختلط اش ϵ^* یا $\hat{\epsilon}$ نوشته شده است. در این جا ما نیز باید علامت * را برای نشان دادن خصوصیات مختلط آن قرار دهیم؛

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (4-1) \quad \text{بنابراین داریم:}$$

وابستگی بین چهار تابع ایمیتنس بطور مختصر در جدول زیر نشان داده شده است:

جدول ۱-۱: روابط بین چهار تابع امپدانس [۱].

	M	Z	Y	ϵ
M	M	μZ	μY^{-1}	ϵ^{-1}
Z	$\mu^{-1} M$	Z	Y^{-1}	$\mu^{-1} \epsilon^{-1}$
Y	μM^{-1}	Z^{-1}	Y	$\mu \epsilon$
ϵ	M^{-1}	$\mu^{-1} Z^{-1}$	$\mu^{-1} Y$	ϵ

در اینجا $\mu \equiv j\omega C_c$ که مطابق مطالب ذکر شده، C_c ظرفیت خازنی سلول خالی است.

تابع مدول $M = \epsilon^{-1}$ ظاهراً اولین بار توسط اسکراما^۶ معرفی شد و به طور محسوس تر توسط مک کرام^۷ استفاده شد. استفاده از ثابت دی الکتریک مختلط خصوصاً توسط کل-کل^۸ معرفی شد، کسی که اولین نفری بود که ϵ را در صفحه مختلط رسم کرد.

۱-۵ تاریخچه اولیه:

طیف سنجی امپدانس به ویژه توسط اندازه گیری و آنالیز برخی از چهار تابع وابسته به امپدانس Z, M, Y و ϵ یا همه آن ها و رسم این توابع در صفحه مختلط توصیف شده است. این رسم می تواند در تفسیر واکنش ac سیگنال کوچک از سیستم ماده-الکترودی که مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته، بسیار مفید باشد.

^۶ Schrama

^۷ McCrum

^۸ Cole-Cole

از نظر تاریخی، استفاده از Z و Y در آنالیز واکنش جریان های الکتریکی ساخته شده از عناصر کلوخه ای ایده آل، به آغاز انسجام مهندسی برق برمیگردد. پیشتر، Z و Y به طور وسیعی در رفتارهای نظری از نیمه رسانا ها و سیستم های یونی استفاده می شدند.

یک مرحله مهم برای آنالیز سیستم های حقیقی، رسم ϵ' و ϵ'' برای سیستم های دی الکتریک در صفحه مختلط توسط کل-کل بود. رسم های صفحه مختلط گاهی اوقات نمودارهای نیکوست^۹ نامیده می شوند. البته این نام، نام غلطی است چون نمودارهای نیکوست به واکنش تابع انتقال (سه یا چهار پایانه) ارجاع داده می شوند در حالی که مرسوم است رسم های صفحه مختلط فقط شامل ورودی دو پایانه باشند.

ظاهراً با توجه به تئوری اسلایترز^{۱۰} در سال ۱۹۶۰، رسم های اولیه از امپدانس در صفحه امپدانس برای الکترولیت های آبی بود. استفاده از رسم های صفحه هدایت ظاهری برای تعیین دقیق قابلیت رسانایی الکترولیت های جامد، توسط باورل^{۱۱} معرفی شد که اولین مقاله مهم در ارتباط مستقیم با IS برای جامدات یونی بود. بعد از آن نیز تعداد دیگری از مقاله های تجربی و نظری مناسب در ارتباط با IS و نقاط صفحه مختلط وجود داشت.

۱-۶ فایده ها و محدودیت ها:

IS یک ابزار تجزیه ای عمومی در پژوهش مواد است، زیرا شامل اندازه گیری الکتریکی نسبتاً ساده ای است که می تواند به صورت خودکار آماده باشد و نتایج آن اغلب ممکن است به تعدادی از متغیرهای مختلط اساسی وابسته باشد؛ از جمله: انتقال جرم، سرعت واکنش های شیمیایی، خوردگی و ویژگی های دی الکتریکی، ساختمان میکروسکوپی و تأثیرات ترکیبی روی رسانایی جامدات.

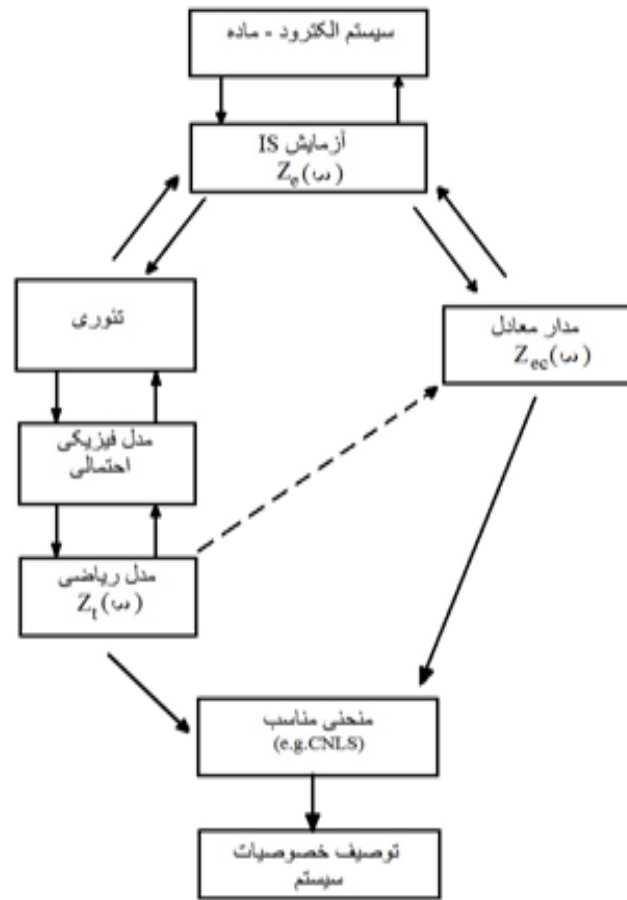
IS می تواند جنبه های عملکرد سلول های سوختی و سنسورهای شیمیایی را پیش بینی کند، و به طور وسیعی برای تحقیق و بررسی رفتار پوسته ای در سلول های زنده استفاده شود. این روش مانند روش کنترل کیفیت تجربی مفید است و می تواند در تفسیر و بیان مراحل الکترونیکی و الکتروشیمیایی بنیادی شرکت کند. یک نمودار از توصیف کلی استفاده از IS در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در این نمودار CNLS^{۱۲} برای کوچکترین میدان های غیرخطی مختلط مناسب قرار گرفته است.

^۹ Nyquist

^{۱۰} Sluyters

^{۱۱} Bauerle

^{۱۲} Complex Nonlinear Least Squares



شکل ۱-۲: نمودار روند اندازه گیری و مشخصه ی یک سیستم الکتروود- ماده [۱]

داده های امیدانس بدست آمده به صورت تجربی برای یک سیستم الکتروود - ماده مشخص، می تواند با استفاده از یک مدل ریاضی دقیق بر پایه تئوری فیزیکی محتمل که امیدانس نظری $Z_t(\omega)$ را پیشگویی می کند و یا توسط یک مدار معادل نسبتاً تجربی که پیش بینی می کند مقاومت ظاهری میتواند توسط $Z_{ec}(\omega)$ مشخص شود، تجزیه و تحلیل شود. در هر دو مورد مدار معادل نسبتاً تجربی یا مدل ریاضی دقیق، پارامترها می توانند تخمین زده شوند و داده های $Z_e(\omega)$ تجربی، با امیدانس مدار معادل پیش بینی شده $Z_{ec}(\omega)$ یا امیدانس نظری $Z_t(\omega)$ مقایسه شوند. چنین انطباقی به طور دقیق تر توسط روش CNLS انجام و کامل شده است.