



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران
۱۹۷۵۸-۵-۳
چاپ اول
۱۴۰۰

INSO
19758-5-3
1st Edition
2022

Identical with
IEC TS
62607-5-3: 2020

فناوری نانو - نانوساخت -
مشخصه‌های کنترلی کلیدی -
قسمت ۵-۳: افزاره‌های الکترونیکی
فیلم نازک نانومواد / مواد آلی -
اندازه‌گیری غلظت حامل بار



دارای محتوای رنگی

Nanotechnology-
Nanomanufacturing –
Key control characteristics-
Part 5-3: Thin-film organic/nano
electronic devices- Measurements
of charge carrier concentration

ICS: 07.120; 07.030

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۱۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۸۱۱۴۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.gov.ir

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iran National Standardization Organization (INSO)

No.2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.gov.ir

Website: <http://www.isiri.gov.ir>

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین، به روزرسانی و نشر استانداردهای ملی را برعهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به‌عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به‌عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organization International de Metrologie Legals)

4-Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«فناوری نانو - نانوساخت - مشخصه‌های کنترلی کلیدی - قسمت ۵-۳: افزاره‌های الکترونیکی فیلم

نازک نانومواد / مواد آلی - اندازه‌گیری غلظت حامل بار»

رئیس:

آقابزرگ، حمیدرضا
(دکتری شیمی معدنی)

سمت و/یا محل اشتغال:

بازنشسته - پژوهشگاه صنعت نفت

دبیر:

نقوی جورشری، فسانه
(کارشناسی ارشد مهندسی برق)

کارشناس مسئول - اداره کل استاندارد استان گیلان

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اسلامی‌پور، الهه
(کارشناسی ارشد زیست شناسی)

کارشناس - گروه استاندارد و ارزیابی ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

پورمحمدی، زهرا
(دکتری شیمی فیزیک)

کارشناس - اداره کل استاندارد استان گیلان

رجبی جورشری، حامد
(دکتری مهندسی مکانیک)

عضو مستقل

رجبی جورشری، علی
(کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)

کارشناس استاندارد و مدرس - دانشگاه احرار رشت

سلیمانی، آتسه
(دکتری مهندسی پلیمر - رنگ)

عضو هیئت علمی - پژوهشگاه رنگ

شاکری، روشنک
(کارشناسی ارشد فیزیک)

کارشناس - سازمان ملی استاندارد ایران

نجدی، اردشیر

مدیرعامل - شرکت پارس خزر نقره

(کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)

ویراستار:

سیفی، مهوش
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

نایب رئیس - کمیته فنی متناظر فناوری نانو
ISIRI/TC 229

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
و	پیش‌گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۲	۴ ساختارهای نمونه
۲	۴-۱ ساختار فلزی/ عایق/ نیم‌رسانا (MIS)
۳	۴-۲ آزمون‌های فیلم نازک با پیکربندی وان در پاو
۴	۵ معیار انتخاب روشی برای اندازه‌گیری غلظت حامل در لایه‌های نیم‌رسانای آلی
۵	۶ قالب‌های مناسب داده
۷	پیوست الف (آگاهی دهنده) مطالعه موردی اندازه‌گیری غلظت حامل مواد آلی
۲۱	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- نانو ساخت- مشخصه‌های کنترلی کلیدی- قسمت ۵-۳: افزاره‌های الکترونیکی فیلم نازک نانومواد/ مواد آلی- اندازه‌گیری غلظت حامل بار» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی / منطقه‌ای به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در یکصد و نهمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

IEC/TS 62607-5-3: 2020, Nanotechnology- Nanomanufacturing – Key control characteristics- Part 5-3: Thin-film organic/nano electronic devices –Measurements of charge carrier concentration

مقدمه

افزاره‌های فیلم نازک نانومواد/ مواد آلی، به‌عنوان جایگزین‌های قابل اطمینانی برای افزاره‌های سبک، کم‌هزینه، انعطاف‌پذیر و دارای قابلیت چاپ در کاربردهای الکترونیکی در گستره وسیع، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. اخیراً، روش‌های دوپه‌کردن^۱ حامل بار، مانند فناوری‌های سیلیکونی کامل، به‌شدت مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌است. در دیوده‌های ساطع‌کننده نور آلی (OLEDs)^۲ و ترانزیستورهای فیلم نازک آلی (OTFTs)^۳، که افزاره‌های فیلم نازک آلی/ نانو معمول هستند، ناخالصی حامل در اطراف نواحی الکتروود اتصالی با دوپه‌کننده‌های دهنده/ گیرنده^۴ مولکولی اغلب برای ساختن اتصالات شبه‌اهمی به‌منظور افزایش جریان الکتریکی در دستگاه‌ها استفاده می‌شود. درحالی‌که اهمیت زیاد دوپه‌کننده حامل در لایه‌های نانومواد/ مواد آلی به‌خوبی شناخته شده‌است، سازوکارهای ناخالصی حامل هنوز به‌طور کامل تشخیص داده نشده و روش ارزیابی غلظت حامل بار برای این مواد ایجاد نشده‌است.

روش‌های مرسوم برای ارزیابی غلظت حامل بار (یا غلظت ناخالصی) و نوع حامل بار (الکترون یا حفره) در مواد نیم‌رسانای آلی، اندازه‌گیری‌های اثر هال و اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ (C-V)^۵ هستند. به‌عنوان مثال، اندازه‌گیری اثر هال^۶ براساس پیکربندی وان در پاول^۷، فرد را قادر می‌سازد تا پارامترهای فیزیکی حامل بار اشاره‌شده در بالا را در آزمون‌هایی با شکل‌های دلخواه از جمله ساختارهای فیلم نازک به‌دست آورد. اما، به‌دلیل جریان‌ها و حساسیت‌های کمتر در اثر هال، این روش تطبیق‌پذیر را نمی‌توان برای مواد با مقاومت بالاتر مانند نیم‌رساناهای آلی کم‌تحرک به‌کار برد. درحال حاضر، اندازه‌گیری ظرفیت-ولتاژ براساس ساختارهای فلزی/ عایق/ نیم‌رسانا، برای نیم‌رساناهای آلی بسیار دوپه‌شده^۸ که سطحی از رفتار فلزی را نشان می‌دهند، قابل استفاده نیست. بنابراین، روش‌های استاندارد و رهنمودهای اندازه‌گیری غلظت حامل بار در لایه‌های نیم‌رسانای آلی نیاز به توسعه دارند.

-
- 1- Doping techniques
 - 2- Organic Light-Emitting Diodes
 - 3- Organic thin-film transistors
 - 4- Dopants donor/acceptor
 - 5- Capacitance-voltage
 - 6- Hall-effect
 - 7- Van der Pauw
 - 8- Highly-doped

فناوری نانو- نانوساخت- مشخصه‌های کنترلی کلیدی- قسمت ۵-۳: افزاره‌های الکترونیکی فیلم نازک نانومواد/ مواد آلی- اندازه‌گیری غلظت حامل بار

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این قسمت از مجموعه استانداردهای ملی ایران شماره ۱۹۷۵۸، تعیین ساختارهای نمونه برای ارزیابی طیف گسترده‌ای از غلظت حامل بار در نانومواد/ مواد آلی است. این استاندارد برای اندازه‌گیری‌های ظرفیت- ولتاژ (C-V) در ساختارهای انباشته فلزی/ عایق/ نیم‌رسانا و اندازه‌گیری‌های اثر هال با پیکربندی وان در پائو تهیه شده است. معیارهای انتخاب روش‌های اندازه‌گیری غلظت حامل بار در لایه‌های نیم‌رسانای آلی نیز در این استاندارد ارائه شده است.

۲ مراجع الزامی

در این استاندارد هیچ مرجع الزامی وجود ندارد.

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف زیر کاربرد دارد!

۱-۳

دوپه کردن

doping

افزودن ناخالصی‌ها به یک نیم‌رسانا برای کنترل غلظت حفره یا الکترون است.

یادآوری ۱- برای نیم‌رساناهای آلی، نه تنها از ناخالصی‌های اتمی، بلکه از ناخالصی‌های مولکولی نیز استفاده می‌شود.

یادآوری ۲- ناخالصی‌های اضافه‌شده، «دوپه‌کننده‌ها» نامیده می‌شوند.

۲-۳

الکتروود اتصال پایین

bottom-contact electrode

۱- اصطلاحات و تعاریف به‌کار رفته در استانداردهای ISO و IEC در وبگاه‌های <http://www.iso.org/obp> و <http://www.electropedia.org/> در دسترس است.

الکتروود اتصال که در زیر لایه نیم‌رسانای موردآزمون قرار دارد.

۳-۳

الکتروود اتصال بالا

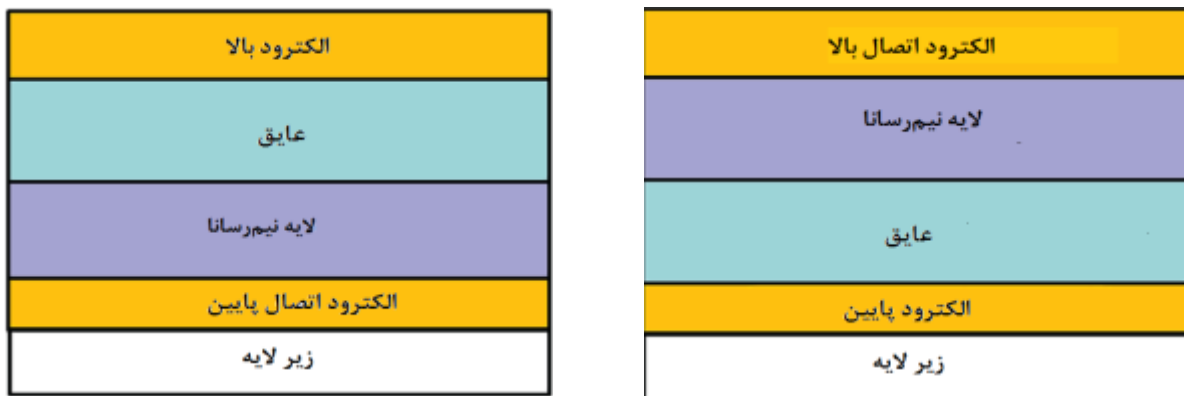
top-contact electrode

الکتروود اتصال که در بالای لایه نیم‌رسانای موردآزمون قرار دارد.

۴ ساختارهای نمونه

۱-۴ ساختار فلزی / عایق / نیم‌رسانا (MIS)^۱

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، ساختن یک ساختار فلزی / عایق / نیم‌رسانا (MIS) برای اندازه‌گیری منحنی ظرفیت-ولتاژ (C-V) در لایه‌های نیم‌رسانای نانومواد/ مواد آلی ضروری است. این ساختار از یک سری خازن عایق و یک ناحیه تخلیه در لایه نیم‌رسانا تشکیل شده‌است.



ب- پیکربندی اتصال پایین

الف- پیکربندی اتصال بالا

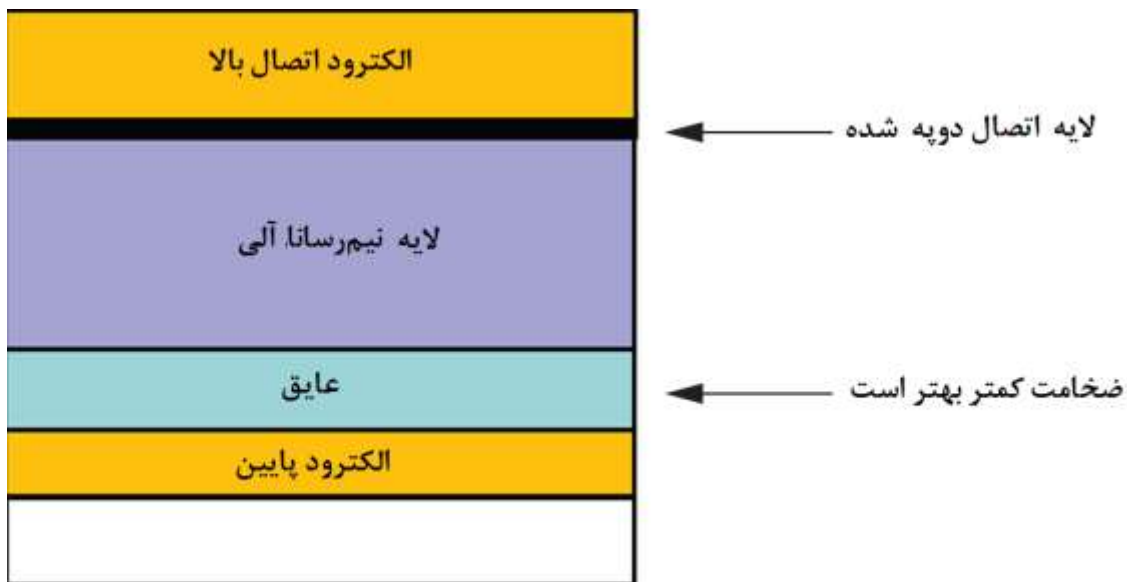
شکل ۱- ساختارهای متداول فلزی / عایق / نیم‌رسانا (MIS)

با این حال، اندازه‌گیری‌های C-V برای ساختارهای MIS که از مواد نیم‌رسانای یکسان ساخته شده‌اند مقادیر مختلفی از غلظت حامل را با توجه به تفاوت در ساختارهای نمونه ارائه می‌دهد (به پیوست الف، بندهای الف-۲، الف-۳ و الف-۴ مراجعه شود). در نتیجه، اندازه‌گیری غلظت حامل با اندازه‌گیری‌های C-V تا حد زیادی به اثرات بیرونی ناشی از ساختار و خواص الکترونیکی خود لایه نیم‌رسانا و ناحیه اتصال فلز/ نیم‌رسانا بستگی دارد. بنابراین، موارد زیر باید برای آماده‌سازی ساختارهای MIS برای اندازه‌گیری‌های قابل اطمینان C-V در نظر گرفته شود (شکل ۲).

1- Metal/ Insulator/ Semiconductor

۱- اتصالات شبه‌اهمی باید بین لایه نیم‌رسانا و الکتروود فلزی تشکیل شود. برای مثال، دوپه کردن اتصال، یکی از روش‌های عملی برای این منظور است.

۲- برای ممانعت از پدیده پسماند^۱ در منحنی‌های C-V اندازه‌گیری‌شده، عایق در ساختار MIS باید تا حد امکان نازک باشد، تا جایی که خواص عایق بودن را به‌خوبی حفظ کند.



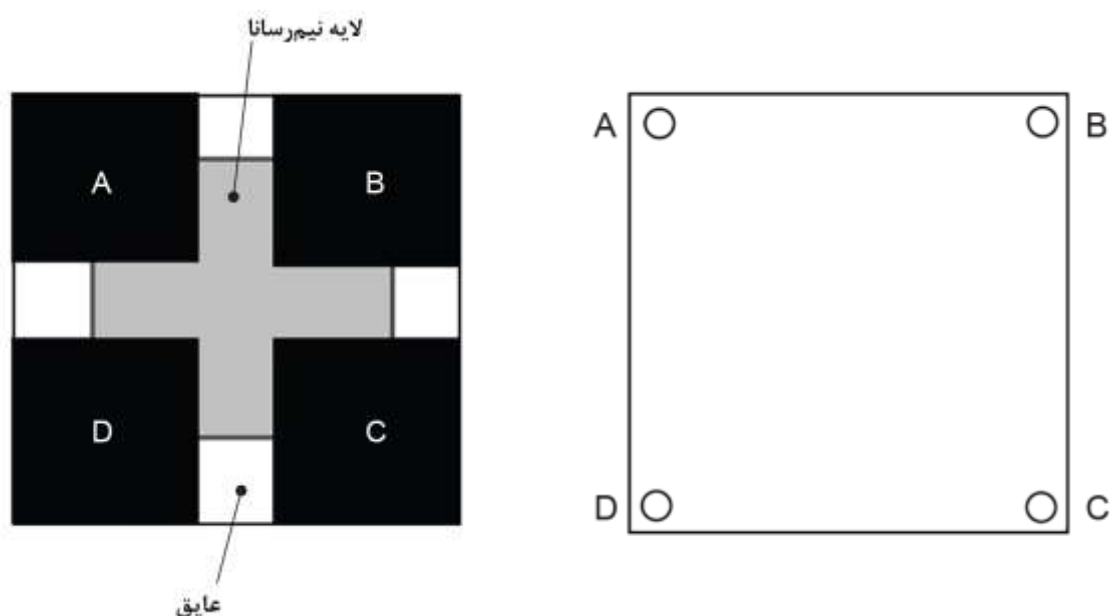
شکل ۲- یک ساختار MIS آلی مناسب برای اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ

۲-۴ آزمون‌های فیلم نازک با پیکربندی وان در پاو

آزمون‌های فیلم نازک با پیکربندی وان در پاو را که در شکل ۳ نشان داده شده‌است می‌توان برای اندازه‌گیری اثر هال در مواد بسیار بلورین نانو/آلی در نظر گرفت.

شکل ۳- الف، پیکربندی وان در پاو متداول را با چهار اتصال نقطه‌ای در گوشه‌های آزمون‌های فیلم مربعی نشان می‌دهد، جایی که فواصل بین اتصال‌های مجزا در مقیاس سانتی‌متر یا میلی‌متر است. با این حال، این روش تطبیق‌پذیر نمی‌تواند برای مواد با مقاومت بالاتر مانند نیم‌رساناهای آلی به دلیل جریان‌های کمتر و حساسیت‌های اثر هال قابل استفاده باشد. بنابراین، یک ساختار الکتروودی با یک شکاف در مقیاس میکرو بین الکتروودهای مورب مخالف می‌تواند یک راه جایگزین برای فعال کردن اندازه‌گیری اثر هال در یک لایه نیم‌رسانای آلی باشد (همانطور که در شکل ۳- ب، نشان داده شده‌است). در این حالت، باید اتصالات شبه‌اهمی بین لایه نیم‌رسانا و الکتروود فلزی شکل بگیرد.

1- Hysteresis phenomena



ب- مثالی از ساختار نمونه با الکترودهای اتصال بالا

الف- ساختار متداول نمونه

شکل ۳- ساختارهای نمونه برای اندازه‌گیری اثر هال با پیکربندی وان در پاو

۵ معیارهای انتخاب روشی برای اندازه‌گیری غلظت حامل در لایه‌های نیم‌رسانای آلی

معیارهای انتخاب روشی برای اندازه‌گیری غلظت حامل در لایه‌های نیم‌رسانای آلی به شرح زیر پیشنهاد شده‌است. در صورتی که اندازه‌گیری‌های اثر هال با پیکربندی وان در پاو و اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ برای فیلم‌های نازک آلی با تحرک حامل بیشتر از مقدار تقریبی $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ در دسترس باشند، اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ برای فیلم‌های نازک آلی با تحرک‌های حامل کمتر از مقدار تقریبی $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ مناسب است. تحرک $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ به عنوان مقدار مرزی بین منطقه جابه‌جایی باندامند و منطقه جابه‌جایی پرش در نظر گرفته شده‌است [1]. تحرک می‌تواند در فیلم‌های نازک بسیار بلورین برخی از نیم‌رساناهای آلی با تحرک بالا به $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ تا $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ برسد. ولی، مقادیر در گستره $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ تا $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ، در تعداد زیادی از نیم‌رساناهای فیلم نازک آلی غیرعادی نیست، زیرا تحرک در واقع به دو عامل درجه نظم در مولکول‌های جامدات و عوامل بیرونی مانند تله‌های حامل و ناخالصی‌ها بستگی دارد [2].

۱- اعداد داخل کروشه به کتاب‌نامه ارجاع می‌دهند.

۶ قالب‌های مناسب داده

نمونه‌هایی از قالب‌های داده امکان‌پذیر برای اندازه‌گیری‌های غلظت حامل بار در نمونه‌های فیلم نازک آلی در جدول ۱ و جدول ۲ داده شده‌است. موارد مربوط به اندازه‌گیری و شرایط نمونه و نتایج باید در این قالب‌ها گنجانده شوند. علاوه بر این، در مورد اندازه‌گیری‌های اثر هال، اکیداً توصیه می‌شود که نمودارهای داده در تغییرات زمانی ولتاژ هال اندازه‌گیری شده، در برابر تغییرات قطبی میدان مغناطیسی نشان داده شوند.

جدول ۱- قالب داده امکان‌پذیر همراه با غلظت حامل‌های به دست آمده با اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ

مورد	داده
شرایط اندازه‌گیری و نمونه	<p>بسامد ولتاژ متناوب AC: [] Hz</p> <p>دامنه ولتاژ متناوب AC: [] V</p> <p>گستره جاروب ولتاژ بایاس DC: [] V تا []</p> <p>محیط اندازه‌گیری:</p> <p>در خلأ [] در گاز بی‌اثر []</p> <p>[] تحت شرایط محیطی (رطوبت نسبی: [] %)</p> <p>دمای اندازه‌گیری شده: [] K</p> <p>ناحیه الکتروود فعال از ساختار MIS: [] cm²</p> <p>ضخامت نیم‌رسانای فعال: [] nm</p> <p>ثابت دی‌الکتریک نیم‌رسانای فعال: []</p>
اندازه‌گیری‌ها	<p>نوع حامل اکثریت: نوع [] N نوع [] P</p> <p>غلظت حامل: [] ± [] cm⁻³</p> <p>ظرفیت عایق در ساختار MIS: [] ± [] nF/cm²</p> <p>پسماند با جاروب بایاس DC:</p> <p>[] بدون پسماند</p> <p>[] با پسماند (پهنای پسماند: [] V)</p>

جدول ۲- قالب داده امکان پذیر همراه با غلظت حامل به دست آمده با اندازه گیری های اثر هال

مورد	داده
شرایط اندازه گیری و نمونه	<p>نوع میدان مغناطیسی: میدان مغناطیسی DC [] میدان مغناطیسی AC [] دامنه میدان مغناطیسی: T [] فرکانس میدان مغناطیسی: Hz [] (در مورد میدان مغناطیسی AC) دامنه جریان DC: A [] محیط اندازه گیری: در خلأ [] در گاز بی اثر [] [] تحت شرایط محیطی (رطوبت نسبی: % []) دمای اندازه گیری شده: K [] ضخامت نیم رسانای فعال: nm []</p>
اندازه گیری ها	<p>نوع حامل اکثریت: نوع N [] نوع P [] غلظت حامل: cm^{-3} [] ± [] تحرک حامل: cm^2/Vs [] ± [] مقاومت هال: Ω [] ± [] مقاومت الکتریکی: Ωcm [] ± []</p>

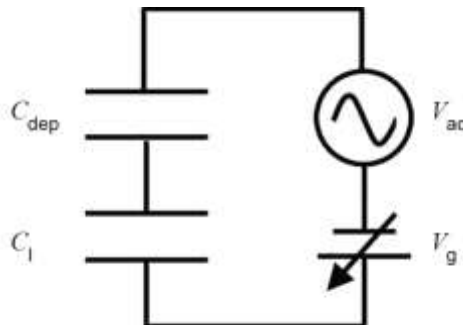
پیوست الف

(آگاهی دهنده)

مطالعه موردی اندازه‌گیری غلظت حامل مواد آلی

الف-۱ روش اندازه‌گیری ظرفیت-ولتاژ (C-V)

منحنی‌های ظرفیت-ولتاژ (C-V) برای ساختار MIS را می‌توان با استفاده از یک امپدانس سنج (ره‌بندی)^۱ معمولی به‌دست آورد که می‌تواند یک ولتاژ AC کوچک (V_{ac}) را روی یک بایاس DC (V_g) بین الکترودهای بالا و پایین ساختار MIS اعمال کند [3]. شکل الف-۱ مدل مدار معادل اندازه‌گیری‌های C-V برای ساختار MIS را نشان می‌دهد. ظرفیت سری کل (C_{tot}) که شامل عایق و منطقه تخلیه در لایه نیم‌رسانا است، اندازه‌گیری می‌شود. یک نتیجه از اندازه‌گیری به‌عنوان نمونه C-V در شکل الف-۲ نشان داده شده‌است. ساختار MIS با توجه به مقدار V_g دو حالت را نشان می‌دهد. یک حالت، حالت تخلیه است که خالی از الکترون‌های رسانا و حفره‌های لایه نیم‌رسانا است. لایه نیم‌رسانای تخلیه‌شده شامل دوپه‌کننده‌های یونیزه‌شده (دهنده‌ها یا پذیرنده‌ها)، مانند یک ظرفیت رفتار می‌کند. حالت دیگر، حالت انباشتگی است که در آن حامل‌های رسانا در سطح مشترک بین عایق و نیم‌رسانا جمع می‌شوند. همانطور که در شکل الف-۲ نشان داده شده‌است، ظرفیت کل ساختار MIS به‌دلیل انتقال از حالت تخلیه به حالت انباشتگی افزایش یافته‌است.



شکل الف-۱- مدل مدار معادل برای اندازه‌گیری ظرفیت-ولتاژ با ساختار MIS

در مورد نیم‌رساناهای نوع p، در بسامد پایین‌تر و بایاس DC منفی، افزاره‌ها ظرفیت لایه عایق C_I را به‌دلیل تجمع حفره‌ها نشان می‌دهند. همانطور که در بخش الف، از شکل الف-۲ نشان داده شده‌است، با جاروب به‌سمت بایاس مثبت، C_{tot} ، لایه نیم‌رسانا به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد. از آن منطقه، بیشترین غلظت حامل (حفره) N را می‌توان براساس تئوری استاندارد در ساختار MIS تعیین کرد.

$$N = \frac{2}{e\epsilon_S\epsilon_0 A^2 \left| \frac{\partial C_{tot}}{\partial V_g} \right|^{-2}} \quad (\text{الف-۱})$$

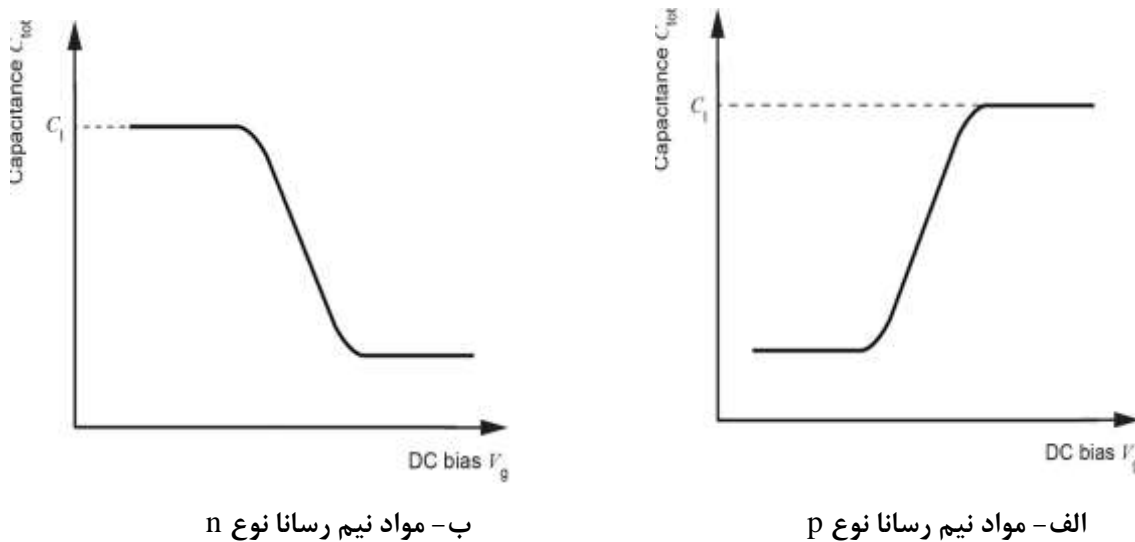
1- Impedance meter

که در آن:

- A ناحیه فعال دستگاه MIS است؛
 ϵ_s ثابت دی‌الکتریک مواد نیم‌رسانای آلی است؛
 e بار الکتریکی اولیه است؛
 ϵ_0 گذردهی دی‌الکتریک در خلاء است؛

C_{tot} ظرفیت کل سری که با عایق و ناحیه تخلیه در لایه نیم‌رسانا تشکیل شده است.

مقدار $|\partial C_{tot}^{-2} / \partial V_g|$ شیب حداقل مربعات رگرسیون خط به‌دست آمده در نمودار منحنی $1/C^2 - Vg$ در ناحیه تخلیه تا حالت تجمع است. این روش همچنین می‌تواند برای مواد نیم‌رسانای نوع n برای ارزیابی غلظت الکترون از مشخصه‌های C-V همانطور که در قسمت ب شکل الف-۲ نشان داده شده‌است، اعمال شود.



شکل الف-۲- منحنی‌های ظرفیت خازنی بر حسب ولتاژ مشاهده شده برای ساختارهای MIS با لایه‌های نیم‌رسانای آلی

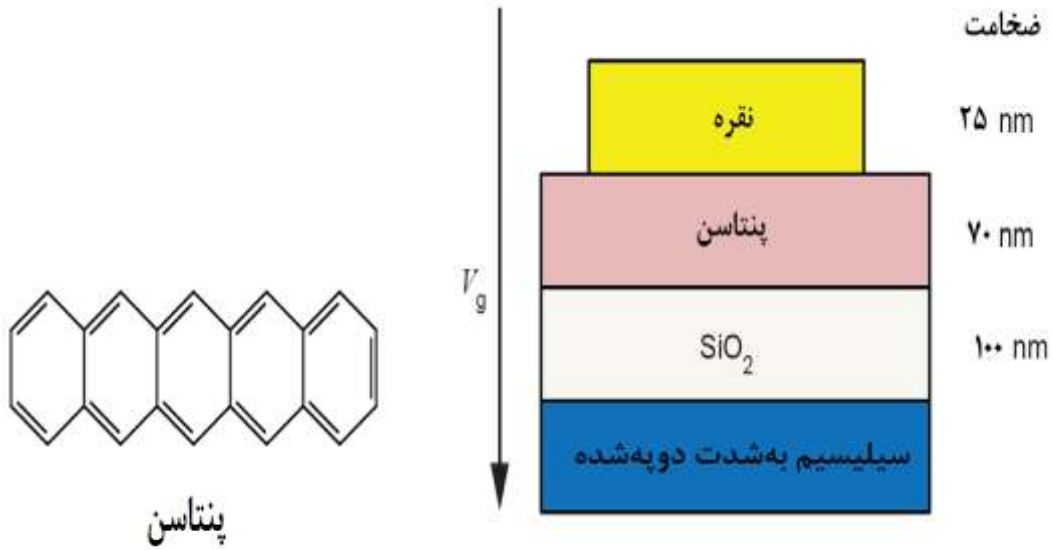
الف-۲ اندازه‌گیری ظرفیت- ولتاژ برای ساختارهای پنتاسن MIS بهینه‌نشده

بند الف-۲ مثال‌هایی از اندازه‌گیری‌های C-V را برای ساختارهای پنتاسن MIS بهینه‌نشده توضیح می‌دهد. پنتاسن یکی از مواد نیم‌رسانای آلی معمول نوع p است و به‌صورت تجاری در دسترس است. فیلم‌های پنتاسن معمولاً تحرک‌های به‌نسبت کوچکی را در گستره $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ تا $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (در منطقه جابه‌جایی پرشی) نشان می‌دهند. در آنجا، اندازه‌گیری‌های اثر هال را نمی‌توان برای ارزیابی غلظت حامل فیلم‌های نازک پنتاسن استفاده کرد.

در شکل الف-۳، الف، یک ساختار MIS تهیه شده برای اندازه گیری C-V نشان داده شده است. بسترهای سیلیکونی به شدت دوپه شده (کوچکتر از $0.02 \Omega\text{cm}$ ، اندازه: $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$) که دارای یک لایه رشد گرمایی SiO_2 با ضخامت 100 nm هستند به عنوان زیرلایه به کار گرفته شده است. پس از تمیز کردن آنها به وسیله فراصوت و چربی زدایی بخار با اتانول، ویفرها با یک پاک کننده ازن UV به مدت 30 دقیقه تحت عمل آوری قرار گرفتند، به دنبال آن غیرفعال سازی سطحی با اکتادسیل تری متوکسی سیلان در فاز گاز انجام شد. پس از حذف بقایای لایه های Si به وسیله فراصوت با حلال های آلی، رسوب یک لایه پنتاسن فعال (ضخامت: 70 nm) بر روی بستر Si انجام شد. سپس، یک الکتروود بالایی باریک طلا به ضخامت 25 nm با رسوب فیزیکی بخار با استفاده از یک الگوی ماسک سایه برای الکتروود دایره ای رسوب داده شد. قطر الکتروود بالایی طلا 0.1 mm بوده است.

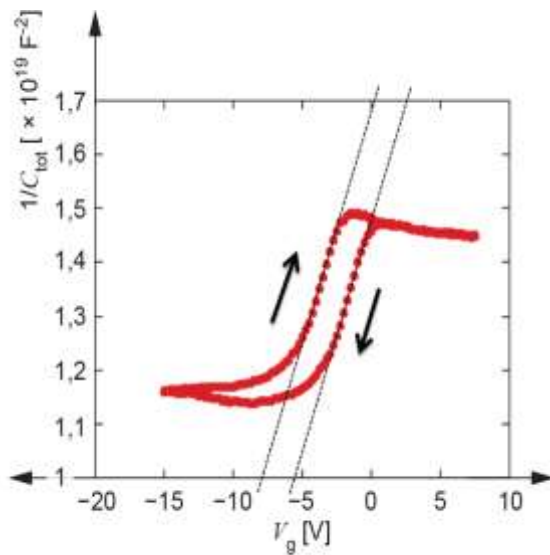
ظرفیت- ولتاژ ساختار فلز/ عایق/ نیم رسانا (MIS) به وسیله یک LCR متر با منبع ولتاژ داخلی DC اندازه گیری شد. بسامد مدولاسیون و ولتاژ برای اندازه گیری ها به ترتیب 100 Hz و 100 mVrms بوده است. اندازه گیری های C-V در خلأ ($1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$) انجام شده است.

منحنی های ظرفیت- ولتاژ به دست آمده در این نمونه در شکل الف-۳، پ، نشان داده شده است که نمودارها ویژگی های نیم رساناهای نوع p را نشان می دهند. این بدان معنی است که ظرفیت کل با بایاس منفی افزایش یافته است و بیانگر رفتارهای تجمع حفره در پنتاسن فیلم نازک نوع p است. پیکان های نشان داده شده در شکل الف-۳، پ و ت، جهت جاروب بایاس را نشان می دهند. منحنی های پسماند نوع تزریقی احتمالاً به دلیل به دام افتادن حامل در لایه پنتاسن و در فصل مشترک پنتاسن/ SiO_2 ظاهر می شوند.

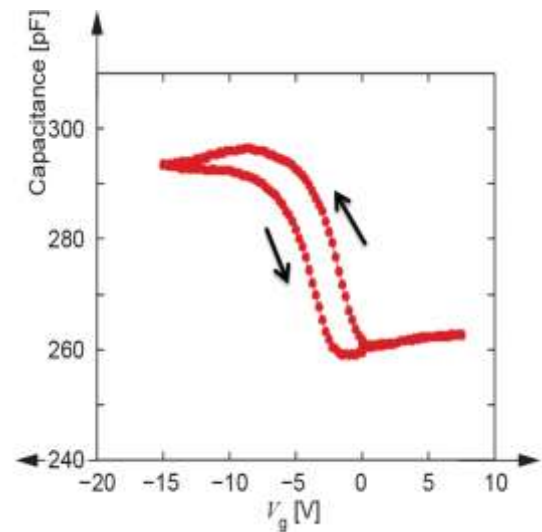


ب- پیکربندی اتصال پایین

الف- پیکربندی اتصال بالا



ت- نمودار $V_g - C_{tot}^{-2}$ محاسبه شده از داده نشان داده شده در پ



پ- منحنی ظرفیت (C_{tot}) ولتاژ (V_g) به دست آمده برای این نمونه

شکل الف-۳- منحنی های ظرفیت- ولتاژ به دست آمده برای ساختار MIS با فیلم پنتاسن با ضخامت ۷۰ nm

غلظت حفره پنتاسن فیلم نازک با استفاده از فرمول الف-۱ و با استفاده از مؤلفه های زیر: $A = 0.95 \text{ mm}^2$, $C = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, $\epsilon_s = 3.70$ و براساس مرجع [4] ارزیابی شد.

خطچین‌ها در شکل الف-۳، ت، نتایج مربوط به حداقل مربعات نمودارهای $1/C^2 - Vg$ را نشان می‌دهد. مقدار $|\partial C_{tot}^{-2} / \partial Vg|$ که میانگین نتایج اندازه‌گیری شده با جاروب بایاس به جلو و عقب است، $9.5 \times 10^{17} F^{-2}V^{-1}$ است. در نهایت، غلظت حفره محاسبه شده $8.7 \times 10^{17} cm^{-3}$ بوده است. در یک کار قبلی بر روی مشخصه‌های C-V دیوده‌های شاتکی^۱ بر پایه پنتاسن، برای فیلم‌های نازک پنتاسن بدون پوشش مقدار $3.1 \times 10^{17} cm^{-3}$ گزارش شده است [5]. با این حال، تصور می‌شود که مقدار به دست آمده در اینجا برای لایه‌های پنتاسن اصلاح‌نشده بسیار بزرگ است، اگرچه به دلیل قرار گرفتن در معرض هوا برای مدت کوتاه، تغلیظ ناخواسته حفره با گازهای اکسیژن می‌تواند پس از آماده‌سازی نمونه اتفاق بیفتد.

الف-۳ تأثیر ضخامت لایه نیم‌رسانا و شرایط اتصال الکتروود بر اندازه‌گیری‌های C-V

بند الف-۳ تأثیرات ضخامت لایه نیم‌رسانا و شرایط اتصال الکتروود بر اندازه‌گیری‌های C-V را برای ساختارهای پنتاسن MIS گزارش می‌کند.

تاکنون، الکتروودهای بالایی طلا ساخته شده با رسوب خلأ در بسیاری از مطالعات قبلی استفاده شده است. با این حال، در طول فرآیند رسوب طلا، اتم‌های طلا با انرژی گرمایی بالا می‌توانند به لایه‌های نیم‌رسانای آلی آسیب وارد کنند [6] و [7]. برای کاهش تخریب لایه پنتاسن در طول رسوب الکتروود بالایی، نوع فلز الکتروود بالایی به نقره (Ag) تغییر یافت، که دمای تبخیر کمتری نسبت به طلا دارد. ضخامت لایه پنتاسن نیز به دو دلیل زیر تا چند صد نانومتر افزایش یافت:

۱- لایه نیم‌رسانای ضخیم‌تر ممکن است نسبت به آسیب ناشی از اتم‌های فلزی رسوب شده حساسیت کمتری داشته باشد.

۲- ضخامت لایه نیم‌رسانا باید بزرگتر از حداکثر عرض تخلیه آن باشد.

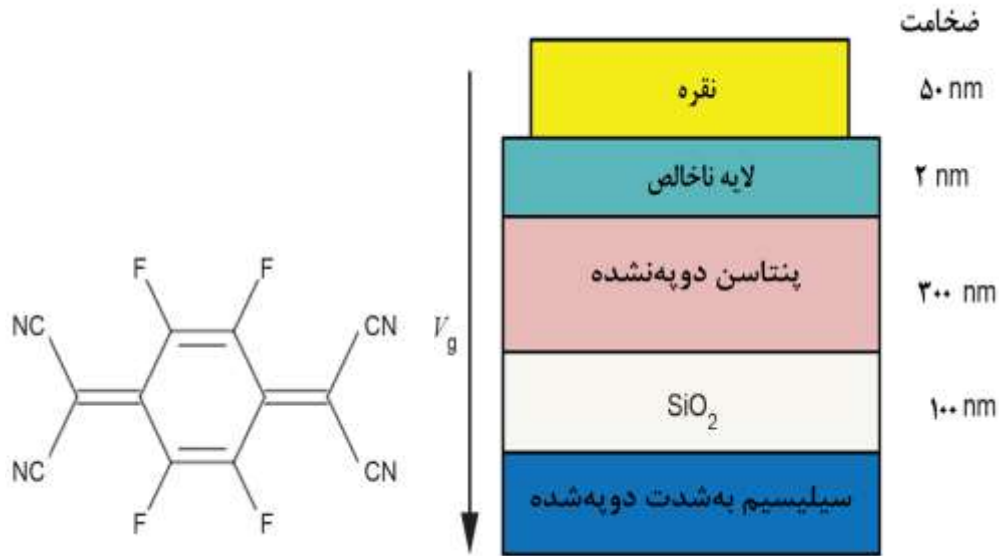
اتصال‌های شبه اهمی بین لایه نیم‌رسانا و الکتروود فلزی نیز برای جلوگیری از تشکیل نامطلوب ظرفیت بین الکتروود بالایی و لایه نیم‌رسانا ضروری است. در اینجا، یک پذیرنده ناخالصی، ۲،۳،۵،۶-تترافلورو-۷،۷،۸،۸-تتراسیانو- کوپینودی‌متان (F4TCNQ)، به منظور ایجاد اتصال‌های شبه‌اهمی بین الکتروود Ag و فیلم پنتاسن استفاده شد.

آماده‌سازی ساختار پنتاسن MIS با اتصال لایه‌های ناخالصی به شرح زیر است: زیرلایه‌های سیلیکونی به شدت دوپه شده^۲ (کوچکتر از $0.2 \Omega cm$ ، اندازه: $1.5 cm \times 1.5 cm$) که دارای یک لایه SiO_2 با ضخامت $100 nm$ هستند به عنوان زیرلایه استفاده شد. پس از تمیز کردن آنها به وسیله فراصوت و چربی زدایی بخار با اتانول، رسوب یک لایه پنتاسن فعال (ضخامت: $300 nm$) بر روی بستر Si انجام شد. به طور متوالی لایه‌ای از F4TCNQ با ضخامت $2 nm$ در بالای لایه پنتاسن قرار گرفت. در نهایت، با استفاده از اثر الگوی یک ماسک، یک الکتروود بالایی نقره با ضخامت $50 nm$ با رسوب فیزیکی بخار برای الکتروود دایره‌ای رسوب داده شد.

1- Schottky
2- Heavily doped

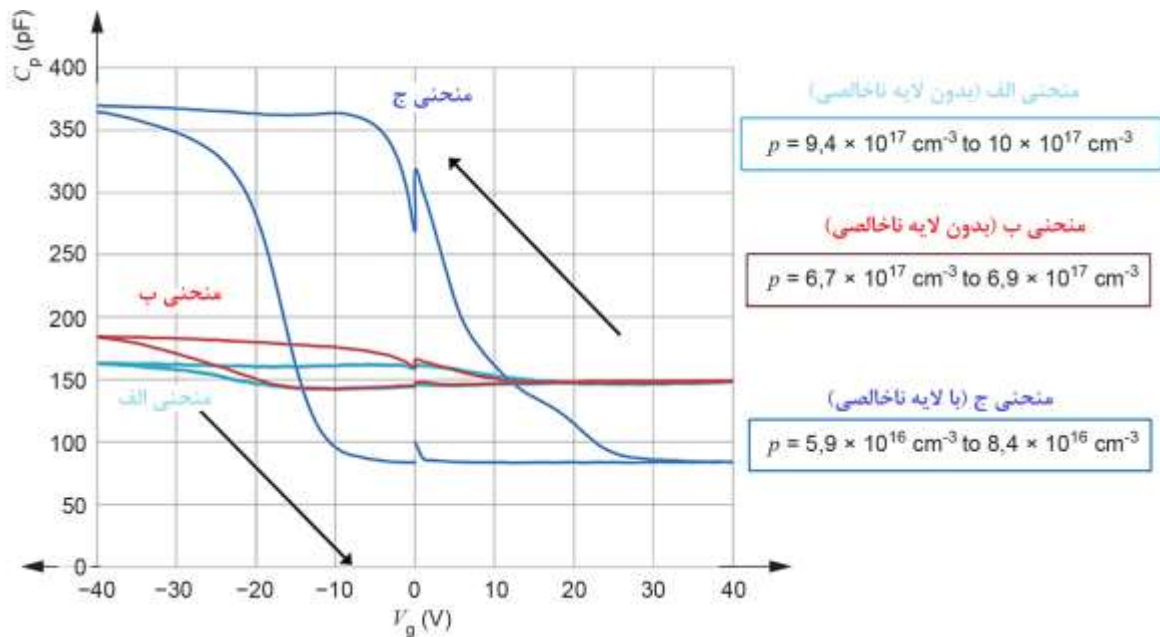
مؤلفه‌های ساختار افزاره در شکل الف-۴ نشان داده شده‌است. علاوه‌براین، افزاره‌های MIS بدون لایه‌های F4TCNQ نیز ساخته شدند.

اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ برای ساختار آماده‌شده طبق همان روش‌های توضیح داده‌شده در بند الف-۲، انجام گرفت، با این تفاوت که ولتاژ مدولاسیون برای اندازه‌گیری‌ها 50 mVrms بوده‌است. منحنی‌های ظرفیت-ولتاژ اندازه‌گیری‌شده در شکل الف-۳، پ، نشان داده شده‌است. پیکان‌های شکل الف-۳، پ، جهت جاروب بایاس را نشان می‌دهد. شکل منحنی‌ها احتمالاً به‌دلیل وجود لایه F4TCNQ و ضخامت بیشتر فیلم پنتاسن، به‌شدت تغییر کرده و غلظت حفره محاسبه‌شده، از مقادیر $6.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ و $9.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ به $7.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ کاهش یافته‌است. در کار قبلی بر روی یک ساختار MIS مبتنی بر پنتاسن، مقدار $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ نیز برای یک ساختار دوپه‌نشده پنتاسن فیلم نازک از اندازه‌گیری C-V گزارش شده‌است [8]. بنابراین، می‌توان درنظر گرفت که بهبود در ساختار MIS می‌تواند اندازه‌گیری C-V را قابل اطمینان‌تر کند. با این‌حال، هنوز به‌دلیل به‌دام افتادن حامل، پدیده پسماند نوع تزریقی اتفاق می‌افتد که امکان بهبود بیشتر در ساختار پنتاسن MIS را نشان می‌دهد.



ب- ساختار مولکولی یک پذیرنده ناخالصی (F4TCNQ)

الف- یک ساختار پنتاسن MIS با لایه پذیرنده ناخالصی



پ- منحنی ظرفیت (C_{tot}) - ولتاژ (V_g) به دست آمده برای ساختار پنتاسن MIS با و بدون لایه F4TCNQ

شکل الف-۴- مثال‌های اندازه‌گیری ظرفیت- ولتاژ برای ساختار MIS ساخته شده از لایه پنتاسن با ضخامت ۳۰۰ nm با و بدون لایه‌های اتصال دوپه‌شده

الف-۴ اندازه‌گیری ظرفیت-ولتاژ برای ساختار پنتاسن MIS با عایق فوق‌نازک

بند الف-۴ نتایج تجربی اندازه‌گیری‌های C-V برای ساختار پنتاسن MIS با یک عایق فوق‌نازک را گزارش می‌کند.

پدیده پسماند در منحنی‌های C-V ناشی از رفتارهای به‌دام انداختن حامل‌های بار است که از الکتروود اتصالی به لایه نیم‌رسانا در ساختار MIS تزریق می‌شوند و تمایل دارند در گستره ولتاژ بزرگ‌تر، برجسته‌تر شوند. بنابراین، به‌منظور امکان‌پذیر شدن اندازه‌گیری C-V در گستره جاروب ولتاژ پایین‌تر، یک عایق فوق‌نازک ساخته‌شده از آلومینیوم اکسید (AlOx) و تک‌لایه خودآرا (SAM) آلکیل فسفونیک اسید برای ساخت یک ساختار پنتاسن MIS استفاده شد.

آماده‌سازی ساختار پنتاسن MIS با لایه AlOx به‌صورت زیر است. یک فیلم آلومینیومی با ضخامت ۵۰ nm با روش پاشش بر روی یک بستر Si قرار می‌گیرد. سپس، سطح Al تحت پلاسمای اکسیژن قرار گرفته و در نتیجه یک فیلم AlOx به ضخامت ۸ nm بر روی الکتروود پایین آلومینیوم تشکیل شد. پس از آن، تک‌لایه خودآرا تترادسیل فسفونیک اسید (TDPA)^۲ بر روی سطح فیلم AlOx ساخته شد. سپس، رسوب یک‌لایه پنتاسن فعال (ضخامت: ۳۰۰ nm) بر روی سطح فیلم AlOx اصلاح‌شده با SAM تشکیل شد. به‌طور متوالی، یک لایه F4TCNQ با ضخامت ۲ nm در بالای لایه پنتاسن قرار گرفت. در نهایت، یک الکتروود بالای نقره با ضخامت ۴۰ nm با رسوب بخار فیزیکی با استفاده از اثر الگوی یک ماسک برای الکتروود دایره‌ای رسوب داده‌شد. یک طرحواره از ساختار نمونه در شکل الف-۵ نشان داده شده‌است.

اندازه‌گیری‌های ظرفیت-ولتاژ برای ساختار آماده‌شده طبق همان روش‌های اجرایی توضیح داده‌شده در بند الف-۳ انجام گرفت، به‌جز اینکه بسامد مدولاسیون و ولتاژ برای اندازه‌گیری‌ها به ترتیب ۱۰ Hz و ۵۰ mVrms بوده‌است. منحنی‌های ظرفیت-ولتاژ اندازه‌گیری‌شده در شکل الف-۵ نشان داده شده‌است. پیکان‌های شکل الف-۵ جهت جاروب بایاس را نشان می‌دهد. تجمع و تخلیه حامل اکثریت (حفره) به‌وضوح در گستره ولتاژ پایین‌تر از ۱ V تا ۲ V مشاهده می‌شود که با کاهش قابل توجه پسماند در منحنی‌های C-V همراه بوده‌است. غلظت حفره لایه نازک پنتاسن با استفاده از فرمول الف-۱ با مؤلفه‌های زیر: $\epsilon_s = 3.7$ ، $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ، $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ، $A = 0.785 \text{ mm}^2$ ارزیابی شد.

خط‌چین‌ها در شکل الف-۵، پ، نتایج حداقل مربعات مناسب نمودارهای $1/C^2 - Vg$ را نشان می‌دهد. مقدار $|\partial C_{\text{tot}}^{-2} / \partial Vg|$ که میانگین نتایج اندازه‌گیری‌شده با جهت جاروب بایاس به جلو و عقب، $6.25 \times 10^{19} \text{ F}^{-2}\text{V}^{-1}$ بوده‌است. در نهایت، غلظت حفره $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ محاسبه شده‌است.

غلظت حفره $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ برای پنتاسن یک مقدار قابل قبول است زیرا غلظت حامل به‌ترتیب 10^{15} cm^{-3} تا 10^{16} cm^{-3} برای بسیاری از فیلم‌های نازک نیم‌رسانا آلی دوپه‌نشده، گزارش شده‌است [9]، [10]، [11].

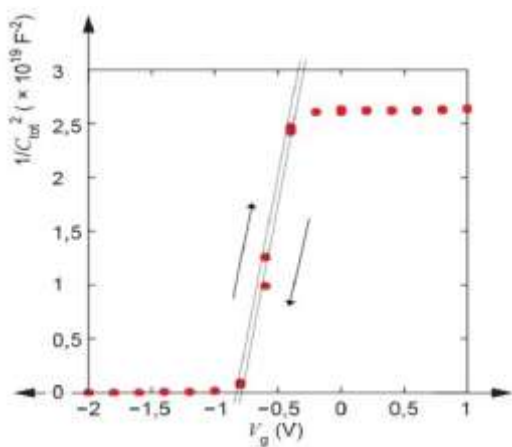
1 - Self assemble monolayer

این نتیجه تأیید می‌کند که طراحی و ساخت مناسب ساختار MIS آلی برای ارزیابی غلظت حامل با استفاده از اندازه‌گیری‌های C-V با قابلیت اطمینان بالاتری قابل انجام است.

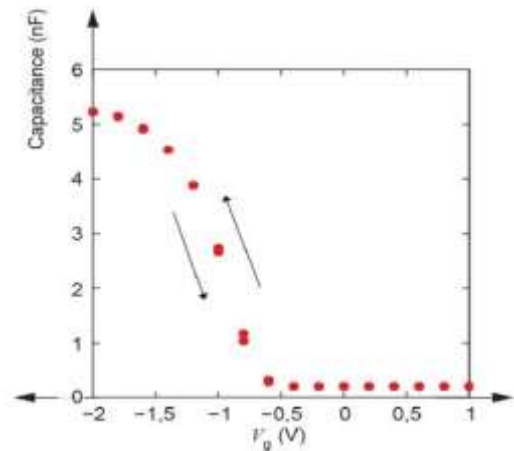
وابستگی‌های بسامد مدولاسیون منحنی‌های C-V اندازه‌گیری‌شده برای ساختار MIS پنتاسن در شکل الف-۵ نشان داده شده‌است. با افزایش بسامد، حفره‌های انباشته‌شده در فصل مشترک نیم‌رسانا/ عایق نمی‌توانند سیگنال مدولاسیون را دنبال کنند. انتقال از تهی‌شدن به انباشتگی در بسامدهای مدولاسیون بالاتر از ۱ KHz، احتمالاً به دلیل تحرک به نسبت کم پنتاسن لایه نازک، قابل تشخیص نیست. با در نظر گرفتن این پاسخ‌های بسامدی در منحنی‌های C-V، ممکن است بسامد مدولاسیون کمتر از ۱ KHz برای ارزیابی چگالی حامل در یک گستره وسیع، مطلوب باشد.



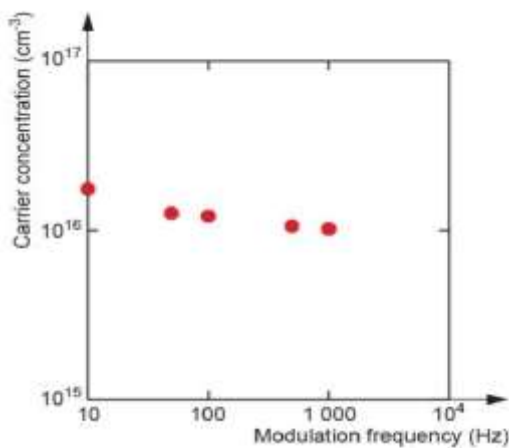
الف- ساختار پنتاسن MIS با عایق AIOx با پوشش فوق نازک SAM



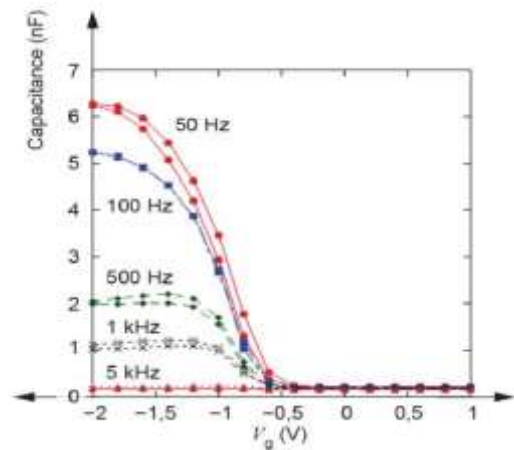
پ- نمودار $V_g - C_{tot}^{-2}$ محاسبه شده از داده نشان داده شده در ب



ب- منحنی ظرفیت (C_{tot}) - ولتاژ (V_g) به دست آمده برای این نمونه



ث- وابستگی بسامدی غلظت حامل به دست آمده برای این نمونه



ت- وابستگی بسامدی ظرفیت (C_{tot}) - ولتاژ (V_g) به دست آمده برای این نمونه

شکل الف-۵- منحنی های ظرفیت - ولتاژ به دست آمده برای ساختار پنتاسن MIS با

یک عایق AIOx اصلاح شده SAM فوق نازک

الف-۵ روش اندازه‌گیری اثر هال

مقاومت الکتریکی یک فیلم آزمون به‌دست آمده از روش وان در پاو به‌صورت زیر است [10]، [11]، [12]:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{AB,CD} + R_{BC,DA}}{2} f\left(\frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,DA}}\right) \quad (\text{الف-۲})$$

$$R_{AB,CD} = \frac{V_{dc}}{I_{AB}}, \quad R_{BC,DA} = \frac{V_{AD}}{I_{BC}}$$

که در آن $R_{BC, DA}$ و $R_{AB,CD}$ به‌عنوان مقاومت‌های بین نقاط اتصال مجزا بدون هیچ میدان مغناطیسی تعریف می‌شود و d ضخامت فیلم نیم‌رسانای آلی است که باید اندازه‌گیری شود و f تابعی است که از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$\frac{R_{AB,CD} - R_{BC,DA}}{R_{AB,CD} + R_{BC,DA}} = \frac{f}{\ln 2} \operatorname{arccosh}\left(\frac{1}{2} \exp\left(\frac{\ln 2}{f}\right)\right) \quad (\text{الف-۳})$$

اندازه‌گیری اثر هال با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی عمود بر سطح فیلم امکان‌پذیر می‌شود [11]، [12]، [13]. در اینجا، جهت مثبت میدان مغناطیسی اعمال‌شده به‌عنوان جهت از بالا به سمت پایین آزمون تعریف می‌شود. مطابق با شکل ۲، V_{CA} و I_{BD} به‌ترتیب به‌عنوان اختلاف پتانسیل بین نقاط C و A و جریان الکتریکی از نقاط B به D تعریف می‌شوند. ولتاژ هال (V_{H-CA}) را می‌توان به‌عنوان تفاوت در مقادیر V_{CA} با و بدون میدان مغناطیسی خارجی به‌دست آورد و نوع حامل اکثریت در فیلم (نوع p یا نوع n) را می‌توان از علامت V_{H-CA} تشخیص داد. در واقع، اندازه‌گیری V_{H-CA} برای دو جهت مخالف میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی به‌منظور حذف اجزای بیرونی به دلیل اثرات نامطلوب ترموالکتریک و مقاومت مغناطیسی از پتانسیل‌های مشاهده‌شده تکرار شده‌است. سپس مقدار میانگین ولتاژ هال بین اتصال‌های C و A محاسبه شده‌است

$$\bar{V}_{H-CA} = \frac{V_{H-CA}(B_+, I_+) - V_{H-CA}(B_-, I_+) + V_{H-CA}(B_+, I_-) - V_{H-CA}(B_-, I_-)}{4} \quad (\text{الف-۴})$$

که در آن B_{\pm} و I_{\pm} قطبیت‌های مختلف میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، میانگین ولتاژ هال بین نقاط اتصال B و D (\bar{V}_{H-BD}) تحت جریان الکتریکی DC بین نقاط اتصال A و C (I_{AC}) نیز با همان روش توضیح داده‌شده در بالا، اندازه‌گیری شد. در نهایت، مقاومت هال خالص (ΔR_H) با رابطه زیر به‌دست آمد

$$\Delta R_H = \frac{\bar{V}_{H-CA} + \bar{V}_{H-BD}}{2I_+} \quad (\text{الف-۵})$$

در اینجا، اگر فرض کنیم که مدل انتقال جرم مؤثر براساس درجات دوربرد برای آزمون‌ها انجام می‌شود، غلظت و تحرک حامل را می‌توان با فرمول‌های زیر تخمین زد:

$$N = \frac{B}{ed\Delta R_H}, \quad \mu = \frac{d\Delta R_H}{B\rho} \quad (\text{الف-۶})$$

که در آن N غلظت حامل، μ تحرک حامل، B قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده و e شارژ اولیه است. توصیه می‌شود به منظور تأیید مثبت تشخیص اثرات هال، تغییرات زمانی در ولتاژهای هال اندازه‌گیری شده به طور مداوم تحت وارونگی مکرر قطبیت‌ها در جریان اعمال شده و میدان مغناطیسی خارجی نظارت شود. سپس، لازم است بررسی شود که قطبیت ولتاژ هال اندازه‌گیری شده به ترتیب مطابق با معکوس سازی‌های قطبی جریان DC و میدان مغناطیسی سوئیچ شده باشد. نوع حامل اکثریت در فیلم نیم‌رسانا (نوع p یا نوع n) را می‌توان از روی علامت مقاومت هال خالص (ΔR_H) قضاوت کرد.

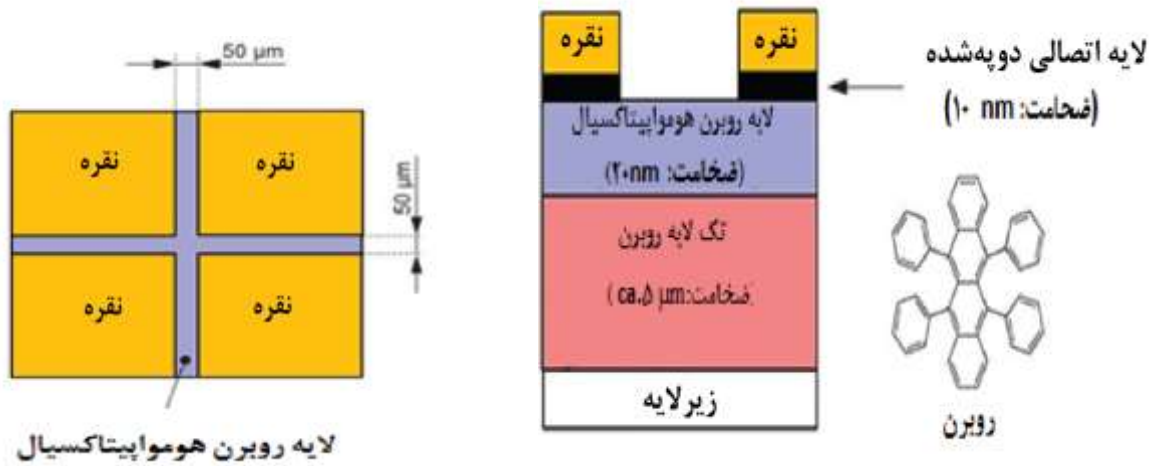
الف-۶ اندازه‌گیری اثر هال برای لایه‌های نیم‌رسانا آلی تک بلورین

بند الف-۶ مثالی از اندازه‌گیری اثر هال برای لایه‌های تک‌بلورین نیم‌رسانا آلی با میدان‌های مغناطیسی AC را توضیح می‌دهد [11]. برای اندازه‌گیری، تک‌بلورهای روبرن اصلاح شده با کلرید آهن (FeCl_3) انتخاب شدند. روبرن یکی از مولکول‌های نیم‌رسانای شناخته شده به واسطه تحرک بالای حمل آن در شکل بلورین است. از FeCl_3 به طور گسترده به عنوان یک دوپه‌کننده پذیرنده همانند F4TCNQ استفاده شده است.

لایه‌های تک‌بلورین حامل دوپه شده روبرن با ضخامت ۲۰ nm به صورت هم‌وآپیتاکسی روی سطح زیرلایه تک‌بلورین روبرن (با ضخامت چند میکرومتر) رسوب داده شده بر روی صفحه کوارتز، رشد داده شدند. غلظت حامل تک‌بلورها با تبخیر هم‌زمان روبرن به عنوان ماده میزبان و FeCl_3 به عنوان دوپه‌کننده پذیرنده، کنترل شد. نسبت دوپه کردن در گستره ۱۰ ppm تا ۱۰۰ ppm تغییر یافت. سپس، الکترودهای اتصال بالای طلا با استفاده از اثر یک الگوی ماسک برای ساخت پیکربندی وان در پاو بر سطوح بلورین روبرن اصلاح شده قرار گرفتند. طول شکاف بین الکترودهای طلای مورب متقابل ۵۰ μm بوده است. برای ایجاد یک اتصال شبه‌اهمی، لایه‌های روبرن بسیار دوپه شده با ضخامت ۱۰ nm (۱۰۰۰۰ ppm) بین لایه روبرن اندازه‌گیری شده و الکترودهای طلا قرار داده شدند. ساختارهای نمونه ساخته شده در شکل الف-۶، الف و شکل الف-۶، ب نشان داده شده است.

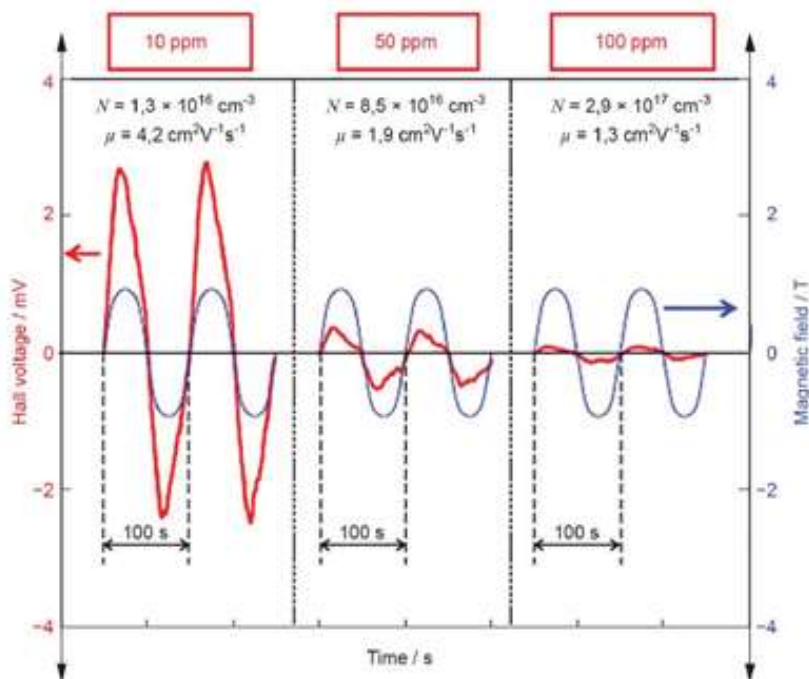
یک سامانه اندازه‌گیری اثر هال / مقاومت ویژه تجاری برای اندازه‌گیری اثر هال استفاده شد. ولتاژ هال تولید شده بین یک جفت الکتروود مورب متقابل با جریان DC ۱۰۰ nA اعمال شده بر یک جفت دیگر الکترودهای مورب متقابل اندازه‌گیری شد. دامنه و بسامد میدان مغناطیسی AC اعمال شده به صورت عمود بر سطح نمونه با پیکربندی وان در پاو به ترتیب ۱ T و ۱۰ mHz بوده است. همه اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شده است.

همانطور که در شکل الف-۶، پ، نشان داده شده است، ولتاژ حال اندازه‌گیری شده شکل‌های سینوسی و تغییرات فاز با میدان مغناطیسی AC اعمال شده را نشان می‌دهد. وقتی قطبیت جریان DC تغییر کرد، قطبیت ولتاژ حال اندازه‌گیری شده نیز تغییر داده شد. این ویژگی‌ها از تشخیص واضح ولتاژ حال در تک‌بلورین دوپه‌شده روبرن پشتیبانی می‌کند. علاوه‌براین، علامت ضریب حال اندازه‌گیری شده مثبت بود و با این واقعیت که این بلورهای روبرن دوپه‌شده پذیرنده بوده و به‌صورت نوع p رفتار می‌کنند، مطابقت دارد. مقادیر اندازه‌گیری شده از ΔR_H و ρ به‌ترتیب برای نمونه دوپه‌شده ۱۰-ppm، مقادیر Ω 2.4×10^4 و Ωcm 3.8×10^1 و برای نمونه دوپه‌شده ۵۰-ppm، مقادیر Ω 3.7×10^3 و Ωcm 1.7×10^1 بوده است. از این داده‌ها، غلظت حامل و تحرک این لایه‌های روبرن با استفاده از فرمول الف-۶، با مؤلفه‌های زیر محاسبه شد: $B = 1 \text{ T}$ ، $d = 20 \text{ nm}$ در نهایت، غلظت حامل و تحرک لایه‌های تک‌بلورین روبرن دوپه‌شده با FeCl_3 در نسبت دوپه‌کردن از ۱۰ ppm تا ۱۰۰ ppm به‌ترتیب از cm^{-3} 10^{16} تا cm^{-3} 10^{17} و cm^2/Vs ۱ ارزیابی شد [11].



ب- طرح نمای بالای ساختار نمونه مورد استفاده برای اندازه گیری اثر هال

الف- طرح مقطعی ساختار نمونه مورد استفاده برای اندازه گیری اثر هال



ب- نتایج اندازه گیری اثر هال به دست آمده برای تک لایه های بلورین روبرن دوپه شده

شکل الف-۶- نتایج اندازه گیری اثر هال برای تک لایه بلورین روبرن دوپه شده با کلرید آهن

کتابنامه

- [1] C. D. DIMITRAKOPOULOS, P. R. L. MALENFANT, "Organic thin film transistors for large area electronics", *Advanced Materials*, Vol. 14, 99-117 (2002)
- [2] W. BRÜTTING, "Introduction to the physics of organic semiconductors", in *Physics of Organic Semiconductors*, edited by W. BRÜTTING, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005)
- [3] P. A. BARNES, "Capacitance-voltage (C-V) characterization of semiconductors", in *Characterization of Materials*, edited by E. N. KAUFMANN, John Wiley & Sons Inc. (2012)
- [4] O. D. JURCHESCU, J. BASS, T. T. M. PALSTRA, "Effect of impurities on the mobility of single crystal pentacene", *Applied Physics Letters*, Vol. 84, 3061-3063 (2004)
- [5] Y. S. LEE, J. H. PARK, J. S. CHOI, "Electrical characteristics of pentacene-based Schottky diodes", *Optical Materials*, Vol. 21, 433-437 (2002)
- [6] X. H. ZHANG, B. Domercq, B. KIPPELEN, "Effect of Au deposition rate on the performance of top-contact pentacene organic field-effect transistors", *Synthetic Metals*, Vol. 159, 2371-2374 (2009)
- [7] Y. XU, C. LIU, H. SUN, F. BALESTRA, G. GHIBAUDO, W. SCHEIDELER, Y.-Y. NOH, "Metal evaporation dependent charge injection in organic transistors", *Organic Electronics*, Vol. 15, 1738-1744 (2014)
- [8] C. K. Chan, A. KAHN, "N-doping of pentacene by decamethylcobaltocene", *Applied Physics A*, Vol. 95, 7-13 (2009)
- [9] Y. ZHANG, B. DE BOER, P. W. M. BLOM, "Controllable molecular doping and charge transport in solution-processed polymer semiconducting layers", *Advanced Materials*, Vol. 19, 1901-1905 (2009)
- [10] P. PINGEL, R. SCHWARZL, D. NEHER, "Effect of molecular p-doping on hole density and mobility in poly(3-hexylthiophene)", *Applied Physics Letters*, Vol. 100, 143303 (2012)
- [11] C. OHASHI, S. IZAWA, Y. SHINMURA, M. KIKUCHI, S. WATASE, M. IZAKI, H. NAITO, M. HIRAMOTO, "Hall effect in bulk-doped organic single crystals", *Advanced Materials*, Vol. 29, 1605619 (2017)
- [12] K. ELLMER, "Hall effect and conductivity measurements in semiconductor crystals and thin films", in *Characterization of Materials*, edited by E. N. KAUFMANN, John Wiley & Sons, Inc. (2012)

- [13] S. OZAKI, Y. WADA, K. NODA, "DC Hall-effect measurement for inkjet-deposited films of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) by using microscale gap electrodes", *Synthetic Metals*, Vol. 215, 28-34 (2016)