

المواصفات التشغيلية لمتسعات الأغشية البوليمرية المزدوجة

أحمد نوري محمود* أسماء عماد عبد** يحيى عبد الكريم سلمان***
قسم علوم البيئة قسم تقانات البيئة قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة الموصل
كلية علوم البيئة وتقاناتها/ جامعة الموصل
*E-mail: Aboibrahem70@yahoo.com **Asmaaemad77@yahoo.com ***Kareem200138@yahoo.com

(أُستلم 13/ 12/ 2018 ؛ قُبل 25 / 2 / 2019)

الملخص

تم في هذا البحث تصنيع مجموعتين من متسعات الألواح المتوازية (MIM-Device) ذات الغشاء البوليمري العازل، المجموعة الأولى يكون فيها الغشاء البوليمري العازل مكوناً من غشاء منفرد من المواد البوليمرية بولي ميثا اكريلات المثل (PMMA) ذات السلسلة الخطية الطويلة المشبعة، والمادة البوليمرية بولي كاربونات (PC) ذات السلسلة الخطية القصيرة المشبعة، والمادة البوليمرية بولي ستايرين غير المشبع (PS) ذات السلسلة الخطية القصيرة غير المشبعة وبسمك $(300 \pm 10) \mu\text{m}$ ، أما المجموعة الثانية فيكون فيها الغشاء البوليمري العازل من النوع المزدوج ومن المواد البوليمرية (PMMA//PS)، (PC//PS) وبسمك إجمالي $(300 \pm 10 \mu\text{m})$ ، بينت النتائج أن استعمال أغشية بوليمرية مزدوجة قد يؤدي إلى إعادة توزيع مديات المناطق في خواص (التيار - الفولتية) بشكل متساوٍ تقريباً، والتي كانت تختلف في مدياتها عندما استعملت المواد البوليمرية بهيئة أغشية منفردة وأن هناك فرقاً في مديات مناطق خواص (التيار - الفولتية) بين البوليمرات الخطية، هذه الفروقات تنشأ بسبب طول أو قصر السلاسل البوليمرية، كما أنها تنشأ بسبب تشبع أو عدم تشبع هذه السلاسل، كما بينت النتائج أن وجود الحد الفاصل في الأغشية البوليمرية المزدوجة يحدث نوعاً من التشوه في خواص (السعة - الفولتية) وأن هذا التشوه يزول مع زيادة كمية الطاقة الحرارية المجهزة للغشاء، وأن مجالاً كهربائياً محتثاً يمكن ان ينشأ داخل الأغشية البوليمرية المزدوجة ويكون نشوؤه بفعل الجهد الخارجي المسلط وبوجود الحد الفاصل كعامل مساعد وأن وجود هذا المجال الداخلي لا يؤدي إلى تطابق قيم السعة بين مرحلتي زيادة ونقصان للجهد الخارجي إلا عند القيم المتدنية للجهد الخارجي، كما أن ازدياد الطاقة الحرارية المجهزة للغشاء المزدوج يؤدي إلى زوال التشوه في خواص (السعة - الفولتية) تدريجياً فضلاً عن ازدياد قيم التباين في قيمة السعة بين مرحلتي الزيادة والنقصان، وإن الأخيرة تعزز فرضية نشوء المجال الداخلي المحفز.

الكلمات الدالة: الخواص الكهربائية، الأغشية البوليمرية، الأغشية متعددة الطبقات، المتسعات.

Operating Specifications for Double Polymeric Thin Films Capacitors

Ahmed N. Mahmmood

*Department of Environmental Science/ College of Environmental Science and Technologies/
University of Mosul*

Asmaa E. Abid

*Department of Environmental Technologies/ College of Environmental Science and Technologies/
University of Mosul*

Yahya A. Salman

Department of Physics/ College of Science/ University of Mosul

ABSTRACT

In this research two groups of parallel plates capacitors (MIM-Device) with thin polymeric film, were prepared. The first group with a single polymeric film of materials (PMMA) with long saturated chain, (PC) with short saturated chain and (PS) with short unsaturated chain and the thickness is about $(300 \pm 10) \mu\text{m}$. The second group where the insulating film is of double type of material (PMMA//PS) and (PC//PS) with total thickness about $(300 \pm 10) \mu\text{m}$. The results showed that the used double thin films may lead to redistribution of the raing of regions of (I-V) characteristics equally which were different when the thin films were single and there was a difference in the raing of regions of (I-V) characteristics of linear polymer chain and these differences are created due to length or shortness of polymer chain and for saturated or unsaturated for this chain, also the results have shown that there is an interface in double polymeric thin film cause and distortion in (C-V) characteristics and it is gone by increasing the amount of thermal energy and the induce electrical filed can be created by effect of external filed and with help of interface in double thin films, the existence of this filed can lead to mismatch in the value of capacity between increase and decrease stages except low values of external field. The increasing of the thermal energy lead to deformation in (C-V) characteristics gradually with increases difference in capacity between increase and decrease stages. The latter strengthens the hypothesis of induced electric field.

Keywords: Electrical Properties, Thin polymer films, double layer, multi layer, capacitor

المقدمة

بعد استخدام المواد البوليمرية في مستلزمات الحياة اليومية شاع استعمالها في مجال الصناعات الكهربائية والإلكترونية، حيث استعملت هذه المواد في صناعة المقاومات والمتسعات الكهربائية كما استخدمت كمواد متألفة في أجهزة الكواشف النووية والبصرية فضلا عن استخدامها في مجال الحماية من تسريب التيارات الكهربائية في الموصلات و حماية المجالات الكهربائية العالية من الانهيار، وبعد التطور الحاصل في مجال تقنيات النانو واستخدام هذه التقنيات في المواد البوليمرية استطاعت هذه المواد لما لها من صفات مميزة الدخول كمادة أساسية في صناعة الحواسيب والهواتف الذكية الأجهزة الإلكترونية ذات التقنيات المتقدمة. (Bin Chen *et al.*, 2016 ; Rui Yang *et al.*, 2014).

التطور الكبير في استخدامات المواد البوليمرية جاء كنتيجة للتطور الكبير في فهم ماهية هذه المواد وطبيعة تركيبها والعوامل المؤثرة فيها سلبا أو إيجابا، حيث كانت بدايات هذا الفهم عام (1928) من قبل العالمين مارك و ماير واللذان يعدان من أوائل المستخدمين لمصطلح الكيمياء الفراغية (Stereochemistry) والذي تطور فيما بعد ليسمى بعلم الهندسة الفراغية للمواد البوليمرية، واستنادا إلى أساسيات هذه العلم بدأت سلسلة اكتشافات المواد البوليمرية المتنوعة حيث اكتشف النايلون - 66 (Nylon-66) في عام (1928) و البولي أثلين (Polye Ethylene) في عام (1937) و مادة التفلون (Teflon) في عام

(1938) وتعد الأخيرة من أول المواد التي دخلت في صناعة الأجهزة الالكترونية (التلفاز) حيث استعملت كمادة الأساس للدوائر الالكترونية ومن ثم تطور هذا العلم ليصل إلى المفهوم الدقيق لتصنيع السباتك البوليمرية الشبكية التداخل (Interpenetrating Polymer Networks) والتي أحدثت منعطفًا كبيرًا في علم البوليمرات واستخداماتها حيث تحول هذا العلم إلى يسمى بعلم التقضيل ((Taylor Mode Science (TMS) ولقد تمحور هذا العلم حول دراسة واستخدامات أية صفة فيزيائية أو كيميائية أو تقنية أو تطبيقية في أية مادة بوليمرية من خلال إعادة هندسة الارتباط والتشابك بين السلاسل البوليمرية. (Roy et al., 2007).

بسبب المتطلبات الصناعية للتقنيات الحديثة ومن أجل أشراك المواد البوليمرية في صناعات هذه التطبيقات، شكلت المواد البوليمرية بهيئة غشاء رقيق وأول انعكاس لهذه الحالة هو تطور وتنوع المتسعات الكهربائية ذات الأغشية البوليمرية العازلة (نبائط موصل - عازل - موصل (MIM-Devices))، حيث أصبح بالإمكان الحصول على متسعات ذات سعات عالية نسبيًا وثبات في هيئة وخواص هذه المتسعات في الاستعمالات المتعددة وضمن ظروف تشغيل مختلفة فضلًا عن حجمها الصغير، وفي نفس المجال أمكن أيضًا تصنيع نبائط من نوع (موصل - عازل - شبه موصل (MIS-Devices)) ونبائط من نوع (شبه موصل - عازل - شبه موصل (SIS-Devices)) والتي استخدم فيها البوليمر بوصفه المادة العازلة بهيئة أغشية رقيقة والتي أثبتت أيضًا كفاءتها من ناحية ثبات الخواص والقدرة على العمل ضمن ظروف ومؤثرات مختلفة مع صغر الحجم أيضًا. (Abdellah, 2016).

لم يقتصر التطور في المواد البوليمرية على تطور الخواص وتعدد الهياكل فقط بل تعدى ذلك ليشمل نقل المادة البوليمرية من تصنيف كهربائي إلى تصنيف كهربائي آخر، فلم تعد المواد البوليمرية عازلة فقط بل أصبحت مواد شبه موصلة ومواد موصلة وذلك عن طريق القدرة على تطعيم وتشويب هذه المواد وبطرق مختلفة وبدقة عالية حتى أن هذه المواد أصبحت أحيانًا تسمى بالمعادن البلاستيكية، أعقب ذلك مرحلة أخرى اجتازتها المواد البوليمرية متمثلة بإنتاج وتصنيع بوليمرات شبه موصلة أو موصلة ذاتية، من دون عمليات التطعيم والتشويب، أطلق على هذه البوليمرات بالبوليمرات الموصلة الذاتية (Intrinsic Conducting (IC/P)) والتي كان لها الدور الكبير في تطوير تصنيع شاشات التلفاز لتصبح شاشات الضخ العمودي (شاشات البلازما). (Elkhaoulani, 1995; Jackel, 2013; et al., 2013). ولقد واجهت هذه البوليمرات مشكلة جديدة متمثلة بعدم قدرة هذه المواد على إظهار كفاءة كافية في حالة استخدامها بهيئة مفردة مستقلة، ومن هذه التطبيقات هي التطبيقات البصرية، توهين موجات الميكروويف، السيطرة الدقيقة على الخواص الكهربائية والالكترونية لهذه المواد وتقييد سلوكيتها بما يلائم ظرف الاستخدام، ومرة أخرى استطاعت المواد البوليمرية مواجهة هذا التحدي من خلال إعادة استعمالها بهيئة غشاء رقيق لكن بشكل طبقات منفصلة متعددة، حيث استطاعت هذه المواد مواجهة هذه المشكلة وإظهار كفاءة عالية تؤهلها لنيل درجة ثقة عالية في الاستخدام في مثل هكذا مجالات وتطبيقات. (Manirul Haque et al., 2016).

وبناءً على كل ما تقدم ويوصف مختصر للمواد البوليمرية يمكن القول أن هذه المواد وخلال قرن من الزمن استطاعت أن تثبت قدراتها وإمكانياتها على استحداث أية صفة أو خاصية إما من خلال إعادة بنائها ضمن تركيبها فوق الجزيئي أو إعادة هندستها الفراغية أو إعادة ارتباطها مع بعضها أو إعادة تشكيلها بهيئات توافق هذه الخصائص والصفات.

الجانب العملي

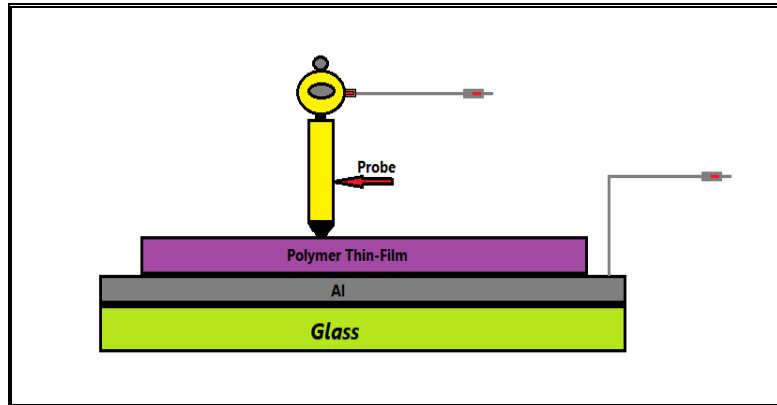
ثلاث مواد بوليمرية ذات الهيئة الخطية للتركيب ما فوق الجزيئي استعملت لتصنيع أغشية بوليمرية مفردة ومزدوجة ومن ثم تم استخدامها بوصفها مواد عازلة في تصنيع نبائط من نوع موصل - عازل - موصل (Metal/Insulator/ Metal-Device) MIM-Devices، هذه المواد هي (Unsaturated Pole styrene (PS) ذات السلسلة الخطية القصيرة غير

المشعبة و (Poly Methyl Meetha Acrylate (PMMA)) ذات السلسلة الخطية الطويلة المشعبة و (Poly Carbonate (PC)) ذات السلسلة الخطية القصيرة المشعبة.

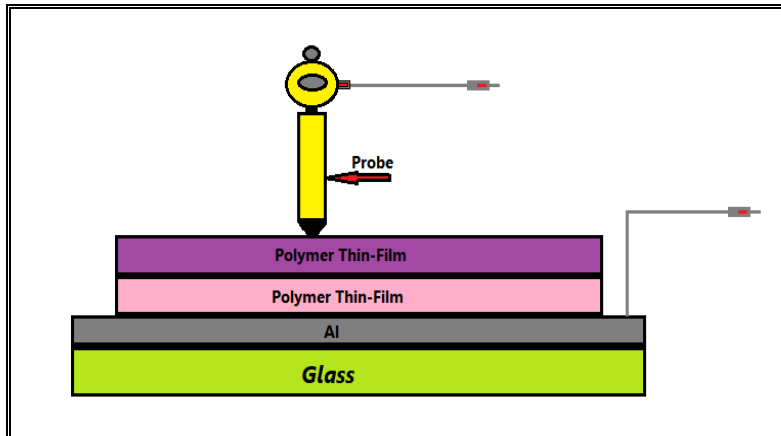
بعد تحويل المواد البوليمرية المستخدمة إلى حالتها السائلة باستعمال المذيب الكلوروفورم (Chloroform) وبالنسب الحجمية (3:1)، (4:1)، (5:1) للمواد البوليمرية (PMMA)، (PC)، (PS) على التوالي استخدمت تقنية التدوير للحصول على أغشية عازلة مفردة منتظمة السمك، إلى حد ما، ويحدود $(300 \pm 10) \mu\text{m}$ لكل مادة بوليمرية واحدة. كما تم استخدام نفس التقنية للحصول على غشائين متتاليين من مادتين بوليمريتين مختلفتين وبسمك إجمالي بحدود $(300 \pm 10) \mu\text{m}$.

صنعت النماذج المستخدمة في هذا البحث باستعمال شريحة زجاجية وبأبعاد (1x1 cm) وبسمك (3 mm)، وباستعمال جهاز التبخير من نوع (Edwards Coating Unit, Model 6E4) رسبت طبقة رقيقة من مادة الألمنيوم عالي النقاوة (99.9%) على الشرائح الزجاجية بعد تنظيفها بالأسيتون والماء المقطر لتمثل هذه الطبقة احد أطراف التوصيل الاومي ، ترسب بعدها الأغشية المفردة أو المزدوجة . وبسبب لونه سطح الأغشية المرسبة تم استعمال الطرف الآخر للتوصيل الاومي على شكل مجس (Probe) وبقطر (3mm) وذلك بسبب قابلية هذه الأغشية على تجاوز عقبة الـ (Air Gab) في التوصيل الاومي ألمجسي.

في قياسات خواص (التيار - الفولتية) استخدمت الدائرة الاومية البسيطة بمصدر جهد مستمر قابل للتغير يصل إلى (3000V)، في خواص (السعة - الفولتية) تم استخدام مصدر وبتردد (1000 Hz). الأشكال (1) و (2) تمثل مخططاً للنماذج مفردة و مزدوجة الغشاء البوليمري العازل.



الشكل 1: مخطط لنموذج المتسعة ذات غشاء البوليمر المفرد العازل

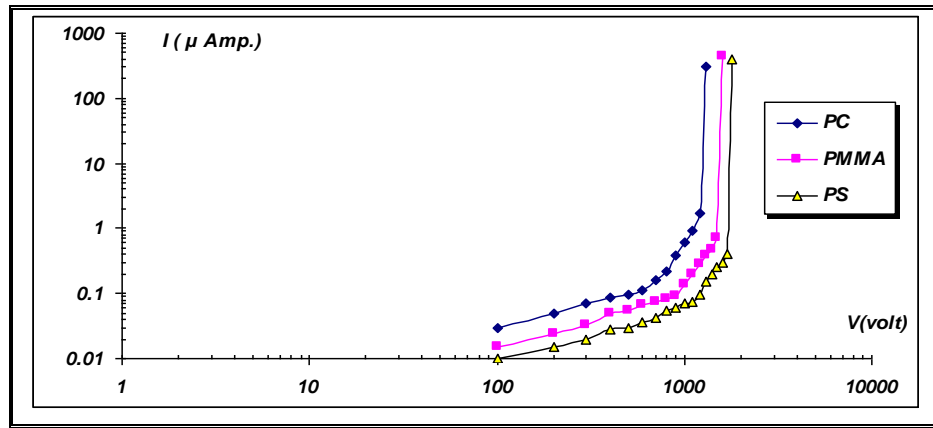


الشكل 2: مخطط لنموذج المتسعة ذات غشاء البوليمر المزدوج العازل

النتائج و المناقشة

1 - خواص (التيار- الفولتية)

الشكل (3) يوضح خواص (التيار- الفولتية) (I-V) لنماذج المتسعات ذات الأغشية البوليمرية لمادة البولي كاربونات (PC) والبولي ميثا مثيل اكريلات (PMMA) والبولي ستايرين غير المشبع (PS) ويسمك $(300 \pm 10) \mu\text{m}$ تقريبا للغشاء العازل.



الشكل 3: خواص (I-V) لمتسعات الأغشية البوليمرية (PC)، (PMMA)، (PS)

يبين الشكل أن المنحنيات للنماذج الثلاثة تتكون من ثلاث مناطق، المنطقة الأولى تدعى بالمنطقة الاومية بينما المنطقة الثانية يكون فيها التيار المحدد بالشحنة الفراغية (Space Charge Limited Current (SCLC)) متغلبا في خواص (I-V) والمنطقة الثالثة هي منطقة الانهيار الكهربائي للغشاء العازل.

كما نلاحظ أن المنطقة الاومية في منحنيات خواص (I-V) لنموذج المتسعة ذات الغشاء البوليمري العازل من مادة (PS) تكون اكبر من المنطقة الاومية لنموذج المتسعة ذات الغشاء البوليمري العازل من مادة (PMMA) والذي بدوره يكون اكبر من المنطقة الاومية لنموذج المتسعة ذات الغشاء البوليمري العازل من مادة (PC). أن السبب في تباين مديات المنطقة الاومية للنماذج الثلاثة يمكن أن يعود إلى طبيعة التركيب الجزيئي و التركيب ما فوق الجزيئي للمواد البوليمرية المستخدمة بوصفها أغشية عازلة في نماذج المتسعات المصنعة، حيث أن مادة (PC) هي في الحقيقة سلسلة خطية قصيرة يكون فيها الارتباط ألتشابكي (Cross Linking) اقل من الارتباط ألتشابكي لسلاسل مادة (PMMA) والتي تكون بهيئة سلاسل خطية طويلة. هذا الفرق في الترابط ألتشابكي أدى الى التفاوت في فرص استحداث ناقلات الشحنة (ناقلات التيار) بتأثير فعل الجهد المسلط وأن هذا الفرق في كثافة ناقلات الشحنة انعكس على مدى المنطقة الاومية لكل مادة من هذه المواد حيث أن المادة الأقل من حيث الترابط التشابكي تكون ذات قدرة اكبر على استحداث ناقلات شحنة وبالنتيجة فإن المنطقة الاومية تكون اقصر. أما فيما يخص (PS) غير المشبع فعلى الرغم من أن سلاسل (PS) هي سلاسل خطية قصيرة إلا أن خاصية عدم التشبع أضافت عائقاً جديداً في التغلب على عقبة المنطقة الاومية حيث أن ما يستحدث من ناقلات شحنة يستنزف بشكل مباشر على إشباع السلاسل البوليمرية غير المشبعة وانعكاسا لهذه الحالة تظهر منطقة اومية أطول من المنطقتين السابقتين المذكورتين أعلاه. (Hans and Uhm, 2008; Hiro, 2010).

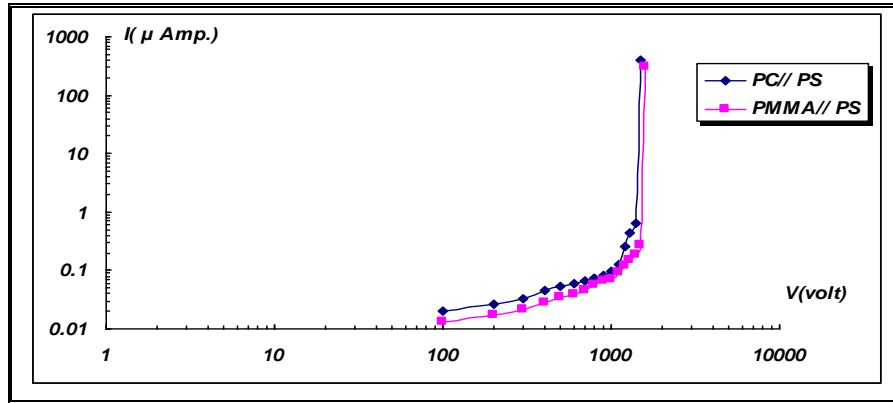
وبالعودة إلى الشكل (3) نلاحظ أن المنطقة التي تعقب المنطقة الاومية هي منطقة يكون فيها التيار المحدد بالشحنة الفراغية (SCLC) متغلبا، وفي حقيقة الأمر أن هذا التيار ينشأ عندما تصل فيها كثافة ناقلات الشحنة الحرة إلى مستوى معين يؤهلها إلى الانتقال من المنطقة الاومية إلى المنطقة المحددة بالشحنة الفراغية وأن هذا الانتقال يجعل استجابة التيار الناشئ بفعل المجال

المسلط على الغشاء العازل أعلى من استجابتيه في المنطقة الاومية (بحدود الضعف تقريبا). من الشكل (3) يلاحظ أن مدى المنطقة الثانية لغشاء (PS) يكون اقل من مدى المنطقة الثانية لغشاء (PMMA) وأن كليهما اقل من مدى المنطقة الثانية لغشاء (PC). ومن اجل فهم هذه الحالة فإن التصور الأكثر قبولا هو أن غشاء (PS) كان في المنطقة الأولى غير مشبع وأن بتسليط الجهد الخارجي على الغشاء أدى إلى استحداث ناقلات شحنة وفي نفس الوقت أدى إلى إتمام الإشباع للسلاسل البوليمرية لهذه المادة وأنه بزيادة الجهد المسلط فإن كثافة ناقلات الشحنة تزداد مما أدى إلى وصول الغشاء إلى مستوى من كثافة ناقلات الشحنة أهلها إلى الانتقال إلى المرحلة الثانية، ومع زيادة الجهد المسلط فإن طاقة هذا الجهد تذهب فقط إلى استحداث ناقلات شحنة وبالتالي فإن كثافة هذه الناقلات سوف تصل إلى الحد الذي ينقل الغشاء من المرحلة الثانية (مرحلة التيار المحدد بالشحنة الفراغية SCLC) إلى المرحلة الثالثة (مرحلة الانهيار) خلال مدى اقصر بسبب عدم وجود مستهلكات للجهد غير مستهلكات الاستحداث. أما في حالة (PC) و (PMMA) فإن السلاسل البوليمرية هي في الحقيقة لا تكون مشبعة بالكامل ولكن هناك نسبة من عدم التشبع تختلف من نوع إلى نوع آخر للمواد البوليمرية. ألا أن هذا الخلل في تركيب المادة البوليمرية لا يكون مؤثرا أو بارزا في المرحلة الأولى وتسلك المادة عندها سلوك المادة المشبعة إلى حد كبير ولكن عند انتقال المادة البوليمرية من المرحلة الأولى إلى المرحلة الثانية يبدأ هذا الخلل في الظهور والوصول إلى المستوى الذي يكون فيه مؤشرا على هيئة خواص الـ (I-V) وذلك بسبب الحاجة إلى كثافة أعلى في استحداث ناقلات شحنة حيث أن الطاقة المجهزة من الجهد الخارجي المسلط لا تستهلك بشكل كامل في استحداث ناقلات شحنة فقط ولكن جزء من هذه الطاقة يذهب إلى إتمام إشباع السلاسل البوليمرية ومعالجة الخلل المتضمن في تركيبية المادة البوليمرية الجزئية والجزء الآخر يستنفذ في استحداث ناقلات شحنة، وعليه فإن المنطقة التي يكون فيها التيار المحدد بالشحنة الفراغية متغلبا في هذه المواد سوف تأخذ بالاتساع وأن توسعها هذا يعتمد وبشكل مباشر على طبيعة التركيبية ما فوق الجزئية للمادة البوليمرية ومواقع الخلل في هذه التركيبية وعلى هذا الأساس اختلفت مديات المنطقة المحددة بالشحنة الفراغية للمواد (PC) و (PMMA) واللذان هما في الأساس مختلفتان عن (PS). (Xiaotong et al., 2014 ; Yang et al., 2012). (Heinz and Bernard, 2011).

وبنفس هذا التصور يمكن فهم الجهد اللازم لإيصال الغشاء البوليمري إلى حالة الانهيار الكهربائي، حيث لوحظ أن فولتية الانهيار لغشاء (PS) تكون منها في الغشاء (PMMA) والذي بدوره يكون اكبر من فولتية انهيار غشاء (PC). حيث اجتمعت جميع الأسباب أنفة الذكر لتحديد متى وكيف وتحت أية ظروف يحصل الانهيار الكهربائي لكل حالة من الحالات الثلاثة قيد الدراسة مع العلم أن المواد البوليمرية تصل حالة الانهيار الكهربائي عندما تصل كثافة ناقلات الشحنة إلى مستويات عالية مما يجعل استجابتها إلى الجهد المسلط كبيرة وحساسة فضلا عن أن المادة تكون قد خزنت كمية من الطاقة بهيئة طاقة كامنة مخزونة في المواقع الفعالة (Active Points) وأن الغشاء يصل إلى مستوى معين يصبح بعدها غير قادر على الحفاظ على هذا المخزون الطاقى، وأن انهيار العازل هو في المفهوم الدقيق تبديد للطاقة المخزونة بفعل الجهد الخارجي المسلط وذلك لعجز المادة العازلة على خزن مستوى أعلى من الطاقة لذلك نلاحظ زيادة طفيفة في الجهد تولد زيادة كبيرة في تيار الانهيار وذلك كون تيار الانهيار يحدث فعلا بسبب عملية تبديد المخزون الطاقى في الغشاء العازل بشكل رئيسي وأن الجهد المسلط عند هذه اللحظة يكون ذا تأثير سابق وليس آني وأن المادة العازلة عند هذه اللحظة تتصرف تصرف الموصلات إلى حد كبير. (Hiro, 2010)، (Deen Jiang et al., 2011).

أما في حالة المتسعات ذات الغشاء البوليمري المزدوج فإن الشكل (4) يوضح خواص (I-V) لنماذج المتسعات ذات الغشاء

.PMMA//PS and PC//PS



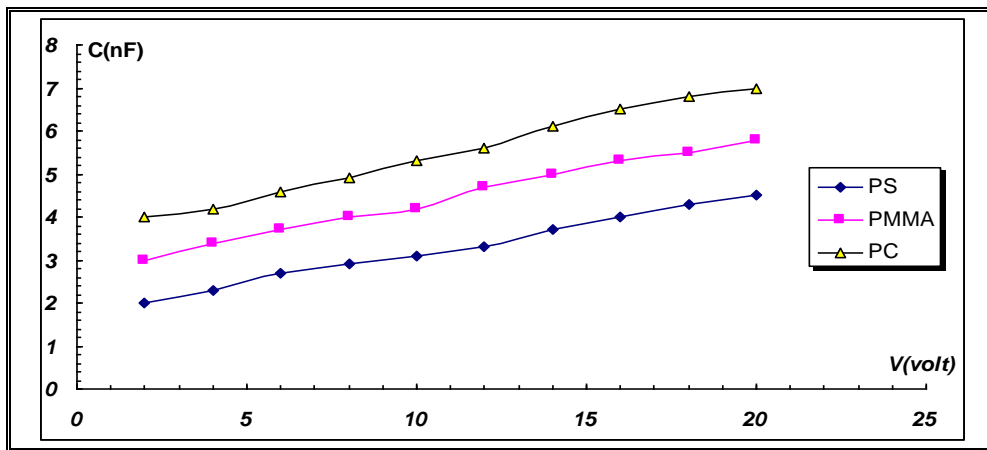
الشكل 4: خواص (I-V) لمتسعات الأغشية البوليمرية (PC//PS) و (PMMA//PS)

يلاحظ من الشكل أعلاه أن المنطقة الاومية ومنطقة التيار المحدد بالشحنة الفراغية تكون متقاربة الى حد كبير وقد ترتقي الى التساوي مع وجود فارق قليل جدا في قيمة الجهد المسبب للانهييار الكهربائي لنماذج المتسعتين، هذا التماثل الكبير في هيئة منحنيات خواص (I-V) لكلا الغشائين يمكن أن يفهم على أساس أن الغشاء المكون من المادتين (PC//PS) هو عبارة عن غشاء مكون من مادتين بوليمريتين ذات سلاسل خطية قصيرة غير مشبعة مع سلسلة قصيرة مشبعة، وان السلسلة القصيرة غير المشبعة يكون فيها معدل استحداث ناقلات الشحنة قليل بينما في السلسلة القصيرة المشبعة يكون فيها معدل الترابط التشابكي قليلاً وبالتالي يكون معدل استحداث ناقلات الشحنة كبيراً، وان وجود الحد الفاصل بين الغشائين يعيق انتقال الشحنات بين الغشائين لذلك فان الشحنات المستحدثة في طرف المادة البوليمرية (PC) تبقى مقيدة ضمن حيز هذه المادة (ضمن سمك غشاء مادة PC) وأن هذا التقييد سوف يستحدث كثافة نسبة عالية لناقلات الشحنة في هذا الجزء من الغشاء، وبغية تجاوز هذا التجمع في ناقلات الشحنة وأعادة الغشاء الى وضع التوازن فإن عملية إعادة اقتناص الشحنات تبرز هنا، ومما تجدر الإشارة إليه هنا هو أن عملية إعادة الاقتناص للشحنات الحاصلة في هذه المرحلة من مراحل خواص (I-V) للغشاء المزوج هي بالتعبير الدقيق عملية إتمام الإشباع للسلسلة البوليمرية غير المشبعة والتي كانت تحصل في المنطقة التي يكون فيها التيار المحدد بالشحنة الفراغية متغلبا عندما كان الغشاء بهيئته المفردة، وأن وجود الحد الفاصل في هيئة هذا الغشاء نقل هذه العملية الى المرحلة التي سبقتها بفعل تأثير الحد الفاصل بشكل أساسي إلى أن يصل الجهد الخارجي المسلط إلى قيمة معينة يكون فيه هذا الجهد قادرا على تجهيز ناقلات الشحنة بكمية كافية من الطاقة تؤهلها لتجاوز عقبة الحد الفاصل وعبره، وبذلك يمكننا القول هنا ان التصور الأكثر دقة لهذه الآلية هو ان وجود الحد الفاصل يؤدي الى اتساع مدى المنطقة الاومية عند طرف غشاء المادة (PC)، وأن انتقال الشحنات عبر الحد الفاصل الى الطرف الثاني من الغشاء بعد وصول الجهد الخارجي المسلط الى المستوى المطلوب سوف يؤدي إلى إحداث وفره اكبر في ناقلات الشحنة في طرف الغشاء (PS) مما يؤدي الى نقصان في مدى المنطقة الاومية وبالتالي فإن المدى التناسبي بين زيادة احد أطراف الغشاء المزوج ونقصان الطرف الآخر هو الذي سوف يحدد مدى المنطقة الاومية. أما في حالة الغشاء المزوج المكون من المادتين (PMMA//PS)، فإن مادة (PMMA) هي من نوع المواد البوليمرية خطية الهيئة ذات سلسلة طويلة مشبعة يكون فيها معدل استحداث ناقلات للشحنة اقل من معدل استحداث ناقلات للشحنة في مادة (PC)، ومع وجود الحد الفاصل والذي يعد المسبب الرئيس في إعاقة عبور الشحنات بين طرفي الغشاء المزوج، نجد ان كثافة نسبية اكبر لناقلات الشحنة تتحقق هنا وان هذا بدوره سوف يؤدي إلى إعادة إتمام الإشباع، وهنا يجب الأخذ بالرأي القائل ان السلاسل ذات الترابط التشابكي الأعلى (سلاسل طويلة) يكون فيها معدل نقصان الإشباع اقل من السلاسل ذات الترابط أنتشابكي الأقل (سلسلة قصيرة) والتي يكون لها نفس التركيبية ما فوق الجزيئية (نفس الهيئة). (Jeong Ho Cho et al., 2008). لذلك فإن معدل إعادة الاقتناص يكون اقل في السلاسل الطويلة عنها في السلاسل القصيرة وعلى هذا الأساس فان مدى المنطقة الاومية سوف يزداد لكن بقدر اقل مما هو عليه

في حالة الـ (PC) مع العلم ان المنطقة الاومية لـ (PMMA) تكون ذات مدى متوسط مقارنة بالمنطقة الاومية لـ (PC) والمنطقة الاومية لـ (PS). لذلك فان معدل ازدياد مدى المنطقة الاومية لـ (PC) سوف يكون متقاربا مع معدل زيادة المدى زيادة المدى للمنطقة الاومية لـ (PMMA). ومع وجود مادة الـ (PS) الذي سوف يسلك السلوك نفسه كما في حالة الغشاء (PC/PS) ومرة أخرى يكون معدل التناسب بين زيادة المنطقة الاومية في احد الأطراف ونقصانها في الطرف الأخر العامل الرئيس في تحديد مدى المنطقة الاومية. وبما ان المعدل التناسبي في الحالتين السابقتين يكون متقارب متوسطية مدى ونقصان قليل مع زيادة مدى ونقصان اكبر نجد ان المنطقتين الاوميتين سوف تكون متقاربتين لنموذجين الغشاءين المزدوجين. (Salleo et al., 2002 ; Jeong Ho Cho et al., 2008). وبنفس التصور يمكن فهم الآلية التي أدت الى التماثل في مدى المنطقة الثانية (SCLC) لكلا النموذجين وتقارب جهد الانهيار لكليهما.

2 - خواص (السعة - الفولتية):

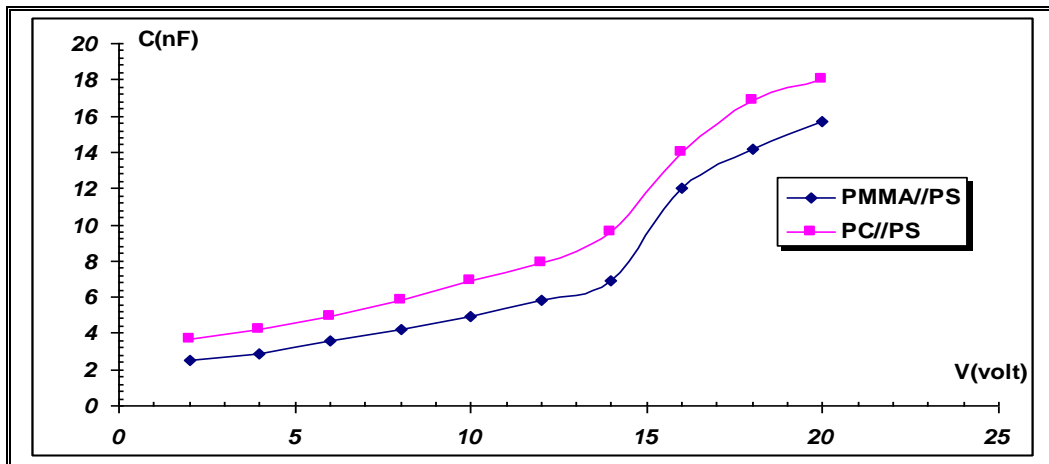
الشكل (5) يوضح خواص (السعة - الفولتية) (C-V) لنماذج الأغشية PC , PMMA , PS



الشكل 5: خواص (C-V) لنماذج المتسعات ذات الغشاء البوليمري المنفردة من مادة (PC , PMMA , PS)

يلاحظ من الشكل (5) أن السعة الكهربائية للغشاء (PS) تكون أكبر من السعة الكهربائية للغشاء (PMMA) واللذان بدورهما يكونان أكبر من السعة الكهربائية للغشاء (PC) لكل قيمة من قيم الجهد الخارجي المسلط. هذا الفرق في قيم السعات يكون مرتبطاً ارتباطاً مباشراً مع طبيعة التركيبة ما فوق الجزيئية للسلاسل البوليمرية، حيث أن السلسلة البوليمرية الخطية الطويلة المشبعة تكون ذات سعة أكبر من السلسلة البوليمرية الخطية القصيرة المشبعة، و يعود السبب في ذلك هو أن السلاسل الطويلة تكون ذات ارتباط تشابكي أكبر من السلاسل القصيرة وأن هذا الترتيب يكون قادراً على تخزين كمية شحنة أكبر مع جهد أقل، بينما في السلاسل القصيرة يكون فيها مخزون الشحنة أقل مع وجود حاجة إلى جهد أكبر للوصول إلى هذا المخزون والحفاظ عليه، وبالتالي سعة أعلى في السلاسل الخطية الطويلة المشبعة من السلاسل الخطية القصيرة المشبعة. من جانب آخر فإن السلاسل غير المشبعة يكون فيها مستوى مخزون الشحنة أكبر من مستوى مخزون الشحنة في السلاسل المشبعة بغض النظر كونها طويلة أم قصيرة، هذه الحالة هي في الحقيقة انعكاس مباشر لقدرة هذه المواد على احتواء وتخزين كمية أكبر من الشحنة بسبب وجود مواقع أو مساحات التخزين والاحتواء لهذه الشحنات في السلاسل غير المشبعة والتي تكون أكبر من مواقع ومساحات التخزين والاحتواء في السلاسل المشبعة وعند قيم جهد متساوية، وهنا نجد من الضروري توضيح المعنى الدقيق لعدم التشبع في السلاسل البوليمرية، حيث أن هذا المصطلح يعني بالمفهوم العلمي الدقيق هو وجود أصرة أو موقع أصرة غير مكتمل الارتباط أو غير مرتبط أصلاً وأن هذه المواقع تكون قابلة لإتمام الارتباط أو استحداث ارتباط جديدة عندما تتوفر شروط الارتباط أو إتمامه وإن هذه الشروط تكون متمثلة بتوفر الشحنة الكهربائية الملائمة لنشوء أصرة تساهمية مع وجود القطبية المناسبة لذلك فضلاً عن توفر التوافق

الجزئي المناسب لحصول مثل هكذا ارتباط، وبذلك نجد أن إتمام الإشباع هو في الحقيقة زيادة في مستوى الشحنة داخل السلسلة البوليمرية حتى وان كان صافي شحنة السلسلة لا يتغير، ولذلك نجد ان سعة الغشاء البوليمري من مادة (PS) يكون اكبر سعة الغشاعين الآخرين وعند قيم جهد خارجي متساوية في الأغشية الثلاثة. (Jun, 2008)، (Kim and senogil, 2013). كما يلاحظ من الشكل (5) ان السعة للأغشية الثلاثة تزداد مع زيادة الجهد الخارجي المسلط وبشكل خطي تقريبا وان هذه الحالة هي موافقة للتوقعات حيث أن في العموم تزداد سعة العوازل البوليمرية كلما ازداد الجهد المسلط عليها و بثبوت باقي العوامل الفيزيائية القابلة للتغير. أما خواص (C-V) للأغشية البوليمرية المزوجة (بولي ميثا اكرلايت المثلث // بولي ستايرين غير المشبع (PMMA//PS) و (بولي كاربونات // بولي ستايرين غير المشبع (PC//PS) موضحة في الشكل (6).

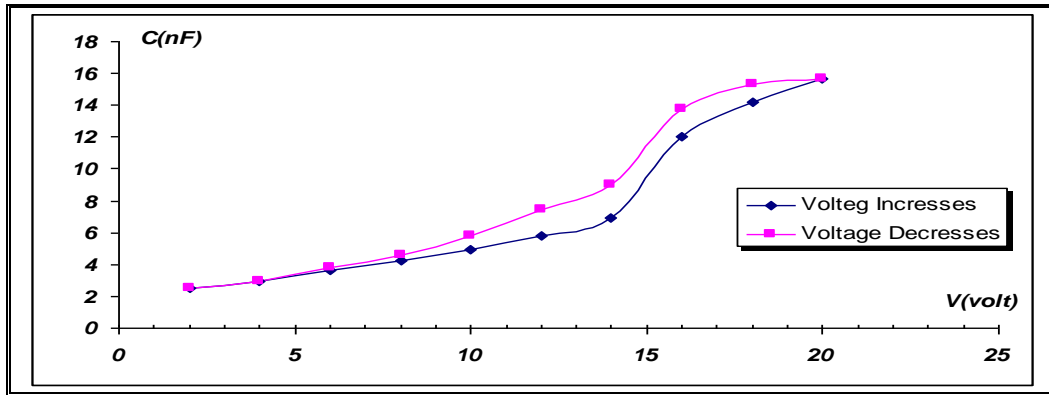


الشكل 6: خواص (C-V) لنماذج المتسعات ذات الغشاء البوليمري المزوج من مادة (PC//PS) & (PMMA//PS)

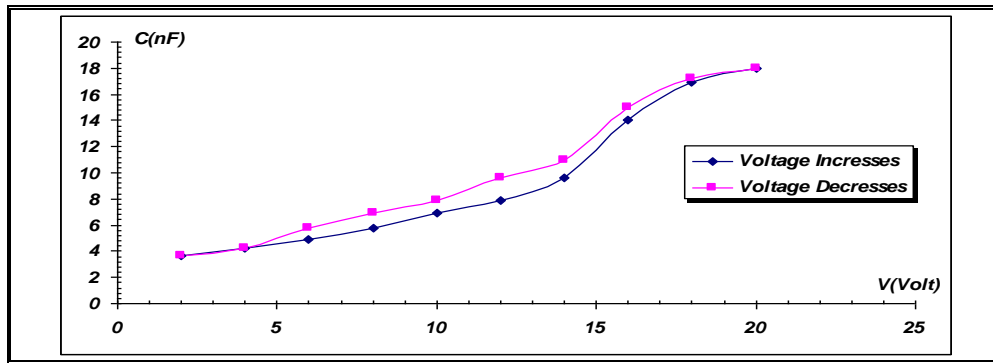
يلاحظ من الشكل أعلاه ان السعة الكهربائية للغشائين تزداد مع زيادة الجهد الخارجي المسلط وبشكل خطي تقريبا مع وجود منطقة تشوه متمثلة بزيادة مفاجئة للسعة أعلى من باقي قيم الزيادة بفعل الجهد المسلط. هذا التشوه في خواص (C-V) يمكن فهمه على أساس ان زيادة الجهد تؤدي الى زيادة في قيمة الشحنة المستحثة داخل الغشاء العازل وبما ان الغشاء العازل هو عبارة عن زوج من الأغشية المشبعة وغير المشبعة فان في حالة وصول الجهد الى قيمة معينة تؤهل فيه ناقلات الشحنة لعبور الحد الفاصل (Interface) بين الغشاعين، فان قدرة الغشاء على احتواء الشحنات تزداد وذلك بسبب وجود الغشاء غير المشبع والذي تكون لديه القدرة على تخزين واحتواء كمية اكبر من الشحنات من الغشاء المشبع وبذلك يتصرف الغشاء على انه غشاء عازل واحد تقريبا مع قدره اكبر على احتواء و تخزين الشحنات وعندها تزداد قيم السعة ومن ثم تأخذ العلاقة الصيغة الطردية المنتظمة مع زيادة الجهد. هذه الآلية تسمى السلوكية الحركية الالكترونية المحفزة بواسطة المجال الكهربائي الخارجي (Electro Kinetic Behavior (EKB)) والتي تكون مشابهة الى حد كبير الى ظاهرة النفق في المواد شبه الموصلة مع وجود اختلاف جوهري هو ان هذه الظاهرة لا تحصل في المواد البوليمرية المفردة بل تحصل في حالات خاصة وضمن ظروف وشروط محددة للغاية متمثلة بوجود الحد الفاصل بين مادتين بوليمريتين ذات درجة تشابه في الهندسة الفراغية للبنية ما فوق الجزيئية بحيث ان هذا التشابه يوفر نفس الوسط تقريبا بين طرفي الحد الفاصل مع وجود اختلاف في توزيع وكثافة محتويات الشحنة والتي بدورها سوف تؤدي الى توفير عامل فارق التركيز في الشحنات والتي سوف تقود في نهاية الأمر الى إجبار الشحنات شبه الحرة الى عبور الحد الفاصل وكنتيجة لذلك زيادة في سعويه الغشاء على هيئة عتبة في خواص (C-V) لهذه المواد (Kuan and Ruey, 2007).

لغرض الوصول الى صورة تكون أكثر وضوحا لسلوكية الغشاء المزوج في خواص (C-V)، درست سلوكية هذه الأغشية في خواص (C-V) على مرحلتين، المرحلة الأولى مرحلة تزايد قيم الجهد الخارجي المسلط، بينما المرحلة الثانية كانت تتمثل

بدراسة الخواص أثناء تناقص الجهد الخارجي المسلط. الشكلان (7) و (8) يوضحان خواص الـ (C-V) لمتسعات الأغشية المزوجة (PMMA//PS) , (PC//PS) في حالتها الزيادة والنقصان للجهد الخارجي المسلط.



الشكل 7: منحنى خواص الـ (C-V) للغشاء المزوج من المواد (PMMA//PS) عند مرحلتها تزايد ونقصان الجهد الخارجي المسلط

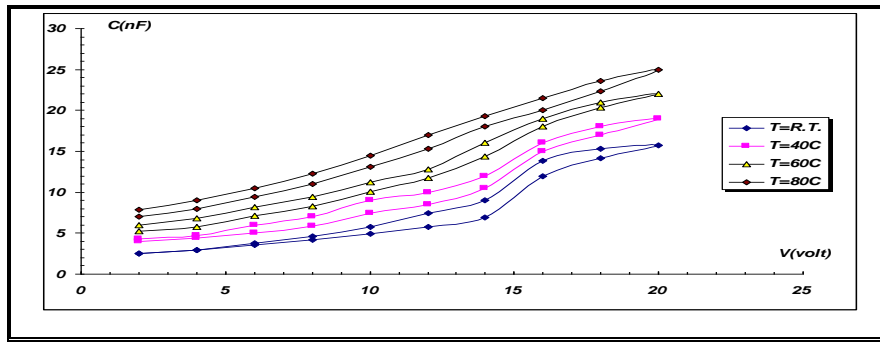


الشكل 8: منحنى خواص الـ (C-V) للغشاء المزوج من المواد (PC//PS) عند مرحلتها تزايد ونقصان الجهد

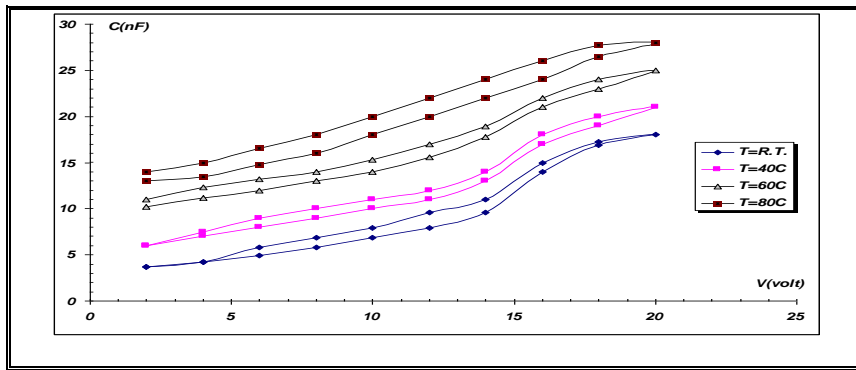
يلاحظ من الشكلين السابقين ان قيم السعة الكهربائية لكلا الغشاءين المزوجين يتصرفان بنفس السلوكية في مرحلة الزيادة ومرحلة النقصان مع وجود فارق ان في مرحلة الزيادة تكون فيها قيم السعة لكل قيمة من قيم الجهد الخارجي المسلط اقل من قيمة السعة لنفس القيمة للجهد المسلط في مرحلة النقصان ما عدا القيم المتدنية للجهد حيث تتطابق عندها قيم السعة في مرحلة الزيادة ومرحلة النقصان. هذه الإزاحة في قيم السعة بين التزايد والنقصان من المحتمل أن تكون حاصلة بفعل نشوء مجال كهربائي ذاتي داخل الغشاء البوليمري في مرحلة الزيادة الجهد الخارجي المسلط، وان هذا المجال هو في الحقيقة ناشئ عن حركية الشحنة (Charge Mobility) داخل الغشاء المزوج وبوجود الحد الفاصل كعامل مساعد لنشوء هذا المجال. هذا المجال ينمو ويزداد مع زيادة الجهد الخارجي المسلط والذي هو الأساس مع زيادة كثافة ناقلات الشحنة الناشئة بفعل الجهد الخارجي المسلط، عند تناقص قيم الجهد الخارجي فأن قيم المجال الداخلي تبقى بعيدة عن هذا التأثير مما يجعل الشحنات المستحدثة بفعل الجهد الخارجي تبقى هي الأخرى بعيدة عن التأثير بهذا التناقص وكنتيجة مباشرة لهذه الحالة تكون سعة الغشاء في مرحلة التناقص أعلى من سعته في مرحلة الزيادة الى ان يتناقص الجهد الخارجي الى قيمة معينة يزول فيها تأثير المجال الداخلي فتعود قيم السعة الى التطابق في المرحلتين (مرحلة الزيادة ومرحلة النقصان). (Lyklema, 2009).

أن النتيجة السابقة والمتمثلة بنشوء مجال داخلي بفعل الجهد الخارجي المسلط وبتحفيز الحد الفاصل قادنا إلى ضرورة البحث التأكد من هذه الفرضية، وبناء على ذلك فلقد تم دراسة خواص الـ (C-V) للأغشية المزوجة من المواد (بولي ميثا اكرلايت المثل // بولي ستايرين غير المشبع (PMMA//PS)) و (بولي كاربونات // بولي ستايرين غير المشبع (PC//PS))

عند قيم درجات حرارة ($T=40C^{\circ}, 60C^{\circ}, 80C^{\circ}$)، ومما تجدر الإشارة إليه هنا ان المجالات الكهربائية المحفزة والتي تنشأ في المواد البوليمرية تكون ذات معدل تأثر ملحوظ بالعوامل الفيزيائية الخارجية وأن هذا التأثير ينعكس بصورة مباشرة على سلوكية أداء هذه الأغشية تجاه خاصية او مجموعة من الخواص بحيث يحصل نوع من التغير الملموس على خواص هذه الأغشية بفعل تأثير هذه العوامل، لذلك فان التغير في سلوكية خواص هذه المواد بفعل التأثير بعامل فيزيائي خارجي يعد مؤشراً يمكن الاعتماد عليه بفرض نشوء المجال الكهربائي الداخلي الذاتي داخل هذه المواد.



الشكل 9: منحنى خواص الـ (C-V) للغشاء المزدوج (PMMA//PS) عند مرحلتي تزايد ونقصان الجهد الخارجي المسلط عند درجات حرارية مختلفة



الشكل 10: منحنى خواص الـ (C-V) للغشاء المزدوج (PC//PS) عند مرحلتي تزايد ونقصان الجهد الخارجي المسلط عند درجات حرارية مختلفة

الشكلان (9) و (10) يمثلان خواص الـ (C-V) لنموذج الغشاءين (PMMA//PS) و (PC//PS) على التوالي عند درجات حرارية مختلفة ($T=40C^{\circ}, 60C^{\circ}, 80C^{\circ}$)، إن التشوه في خواص الـ (C-V) للنموذجين والمتمثل في الزيادة غير المنتظمة لقيم السعة عند قيم محددة للجهد الخارجي المسلط تبدأ بالتناقص مع زيادة كمية الحرارة المجهزة للغشاءين إلى أن تصل إلى مرحلة يتلاشى فيها هذا التشوه تقريبا. تحصل هذه الحالة عندما تصل درجة حرارة الغشاء إلى ($80C^{\circ}$). هذه الحالة يمكن أن تفهم على أساس الفرضية القائلة أن ناقلات الشحنة تزداد طاقتها الحركية كلما ازدادت طاقتها الحرارية، وان هذه الزيادة في الطاقة الحركية تجعل من القابلية الحركية لهذه الناقلات أعلى، ما يعود على هذه الناقلات بزيادة في قدرتها على تجاوز الحد الفاصل، وبتعبير أدق تقليل تأثير الحد الفاصل وبذلك تقترب سلوكية الغشاء المزدوج ذو الطبقتين من سلوكية الغشاء المفرد ذو الطبقة الواحدة، وكنتيجة لذلك فإن خواص (C-V) كانت منتظمة خالية من التشوهات تقريبا. (Guang Fenq et al., 2012).

فضلا عن ذلك فإن قيم السعة في مرحلة الزيادة للجهد الخارجي المسلط تتطابق مع قيم السعة في مرحلة النقصان عندما تكون قيم الجهد الخارجي متدنية وان هذا التطابق يتلاشى كلما ارتفعت درجة حرارة الغشاء، ومن المحتمل ان تكون هذه الحالة مؤشراً على نشوء المجال الداخلي الذاتي والمتولد بفعل الجهد الخارجي وبمساعدة الحد الفاصل، حيث ان زيادة الطاقة الحرارية للغشاء

البوليمري تؤدي إلى زيادة في كثافة ناقلات الشحنة والتي تؤدي إلى نشوء مجال داخلي ذاتي، لذلك فإن عند الدرجات الحرارية العالية لا تتطابق قيم السعة على الرغم من وصول الجهد الخارجي المسلط إلى قيم قليلة أو إلى الصفر، وتتناقص السعة كلما تناقصت كمية الحرارة المجهزة للغشاء لتصل إلى حالة التطابق عندما يكون تأثير المجال الخارجي منخفضاً وكمية الحرارة المجهزة للغشاء قليلة، وهذه النتيجة تعزز فرضية نشوء المجال الداخلي الذاتي في مثل هذا النوع من الأغشية. (Kim et al., 2014)، وعلى الرغم من وجود نوع من التناقض في تفسير الملاحظة الأولى والملاحظة الثانية، حيث افترضت الملاحظة الأولى أن غياب الحد الفاصل هو الذي يؤدي إلى انتظام في خواص الـ (C-V)، بينما افترضت الملاحظة الثانية أن وجود الحد الفاصل يعد عاملاً مساعداً على نشوء المجال الداخلي المحفز، و في الحقيقة لا وجود للتناقض بين التفسيرين حيث أن التشوه يحصل عند قيم معينة للجهد الخارجي المسلط وهذه القيم لا تكون ضمن تصنيف القيم المتدنية وبذلك فإن غياب الحد الفاصل يعد مقبولاً ولا يتناقض مع فرضية وجوده في القيم المتدنية فضلاً عن ذلك فإن وجود المجال الداخلي المحفز يؤدي هو الآخر إلى حصول نوع من الانتظام في خواص الـ (C-V) لنموذج الغشاء المزدوج.

الاستنتاجات

- 1- استعمال أغشية بوليمرية مزدوجة قد أدى إلى إعادة توزيع مديات المناطق في خواص (التيار - الفولتية) بشكل متساوٍ تقريباً، والتي كانت تختلف في مدياتها عندما استعملت المواد البوليمرية بهيئة أغشية مفردة، مع وجود شرط التوافق في ترتيبها الهندسي الفراغي وتوزيعاتها ما فوق الجزيئية ووجود خاصية الإشباع في إحدى المواد وعدم الإشباع في المادة الأخرى.
- 2- وجد أن هناك فروقاً في مديات مناطق خواص (التيار - الفولتية) بين البوليمرات الخطية، هذه الفروقات تنشأ بسبب طول أو قصر السلاسل البوليمرية، أو بسبب تشبع من عدم تشبع هذه السلاسل.
- 3- لوحظ أن وجود الحد الفاصل في الأغشية البوليمرية المزدوجة يؤدي إلى إحداث نوع من التشويه في خواص الـ (السعة - الفولتية) لتلك الأغشية، إن هذا التشوه لم يكن موجوداً في الأغشية المفردة كما انه يتلاشى مع زيادة كمية الطاقة الحرارية المجهزة للغشاء.
- 4- بسبب نشوء المجال الداخلي المحفز بفعل الجهد الخارجي المسلط وبمساعدة الحد الفاصل فإن خواص (السعة - الفولتية) لتلك الأغشية تختلف في مرحلة زيادة الجهد الخارجي المسلط عنها عن مرحلة النقصان لهذا الجهد مع تطابقها في القيم المتدنية للجهد الخارجي وعندما تكون كمية الطاقة الحرارية المجهزة للغشاء قليلة.
- 5- كلما ازدادت كمية الطاقة الحرارية المجهزة للغشاء المزدوج ازداد معها مدى التباين في قيم السعة بين مرحلة زيادة الجهد الخارجي المسلط عنها عن مرحلة النقصان حتى عند قيم الجهد الخارجي المتدنية. وهذا يعزز فرضية نشوء المجال الداخلي المحفز.

المصادر

- Abdellah, S.F. (2016). Mechanical and thermal properties of promising polymer composites for food packaging applications. *J. Materials Sci., and Eng.*, **137**(1).
- Bin, C.; Matthias, K.; Mark S.; James, B.; Federico, C. (2016). Electrical breakdown of dielectric elastomers: influence of compression, electrode's curvature and environmental humidity. *J. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, **7**(9), 123-134
- Deen, J.; Dong, M.; Jianz, H.W. (2011). Density functional theory for differential capacitance of planar electric double layers in ionic liquids. *J. Che. Phy. Lett.*, **3**(5), Issues 4-6, 153-158.
- Elkhaoulani, A.; Arrakhiz, F.Z.; Benmoussa, K.; Bouhfid, R.; Qaiss, A. (2013). Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene. *J. Materials and Design.*, **1**(49), 203-208.
- Guang, F.; Deen, J.; Peter, T. (2012). Curvature effect on the capacitance of electric double layers at ionic liquid/onion-like carbon interfaces. *J. Chem. Theory Comput.*, **3**(8), 1058-1063.

- Manirul, S.K.; Jorge, A.A.; Rey, A.A.M.; Yunusa, U.; Ricardo, A. (2016). Electrical properties of different polymeric materials and their applications: The influence of electric field. *J. Materials and Design*, **3**(59), 222-229.
- Jeong, Ho Cho; Jiyoul Lee; Yu Xia; Bong, S.K.; Yiyong He; Michael, J.R.; Timothy, P.L.; Daniel, F.C. (2008). Printable ion-gel gate dielectrics for low-voltage polymer thin-film transistors on plastic. *J. Nature Materials*, **5**(7), 900–906.
- Jackel, M. (1995). Thermal properties of polymer/particle composites at low temperatures. *J. Cryogenics*, **2**(35), Issue 11, 713-716.
- Jun, Y. (2008). Enhancement of the ionic conducting of poly-ethylene oxide electrolyte films by polyenilic addition. *J. I. Master Sci.*, **5**(33), 2871-2823.
- Hiro, T. (2010). Electrical energy released from structure of Al/ Polyamide LB Film/ Au. *J. Thin Solid Films*, **5**(7), 248 – 252.
- Heinz, D.; Bernard, M. (2011). Selecting and applying film capacitors. *J. Electric News*, **2**(47), Issue 13, 1- 13.
- Han, S.; Uhm (2008). Investigations of electrical breakdown properties in curved electrons. *J. Plasma Phy.*, **11**(7), 232-241.
- Kuan-Da, H.; Ruey-Jen, Y. (2007). Electro kinetic behavior of overlapped electric double layers in Nan fluidic channels. *J. Nanotechnology*, **11**(18).
- Kim, S.; Senogil, I.M. (2013). Electrical properties of aluminum oxide films deposited on indium-tin-oxide glasses. *J. Vac. Sci. Tech.*, **1**(3), 953-956.
- Kim, M.C.; Cho, S.H.; Lee, S.B.; Kim, Y.; Boo, J.H. (2014). characterization of polymer – like thin films deposited on silicon and glass substrates using PECUD method. *J. Thin Solid Films*. **9**(6), 592- 598.
- Lyklema, J. (2009). Quest for ion–ion correlations in electric double layers and overcharging phenomena. *J. Advances in Colloid and Interface Sci.*, **8**(147), 205-213.
- Manirul Haque, S.K.; Jorge, A.A.; Rey, A.A.M.; Yunusa, U.; Ricardo, A. (2016). Electrical properties of different polymeric materials and their applications: The influence of electric field. *J. Materials and Design*, **3**(59), 222-229.
- Roy, A.; Srivastavap, C.; Bhattacharya, B.; Bhattacharyad, L. (2007). Electrical breakdown in very thin Al₂O₃ films. *Int. J. Electronics*, **2**(8), 343-351.
- Rui, Y.; Zenghui, W.; Philip, X.; Feng, L. (2014). Electrical breakdown of multilayer MoS₂ field-effect transistors with thickness-dependent mobility. *J. Nanoscale*, **6**(6), 12383-2390, Issue 21
- Salleo, A.; Chabiny, M.L.; Yang, M.S.; Street, R.A. (2002). Polymer thin-film transistors with chemically modified dielectric interfaces. *J. App. Phy. Lett.*, **22**(81), Issue 23, 222-134.
- Xiaotong, L.; Yunlong, G.; Yongqiang, M.; Huajie, Ch.; Zupan, M.; Hanlin, W.; Gui, Yu; Yunqi Liu (2014). Flexible, low-voltage and high-performance polymer thin-film transistors and their application in photo/thermal detectors. *J. Advanced Materials*, **3**(26), Issue 22.
- Yang, P.X.; David, L.C.; John, B. (2012). Electrical properties of Sr Bi₂ Ta₂ O₂ ferroelectric thin films at low temperature. *J. App. Phy. Lett.*, **22**(81).