Ministry of Education and Scientific Research
Elmergib University
Faculty of Engineering Al-khoms
Department of Electrical and Computer Engineering
Elmergib Journal of Electrical and Electronic Engineering

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المرقب
كلية الهندسة الخمس
قسم الهندسة الكهربائية والحاسوب
مجلة المرقب للهندسة الكهربائية والالكترونية

ISSN: 2959-0450

Volume 3, Issue 2, --- 2024

دراسة تطور المكثفات ذو المرونة الفائقة

ميلاد محمد عرير[1]*، ابراهيم سالم علي[2]

[1]كلية تقنية الحاسوب، طرابلس، ليبيا، **meladmohammed@gmail.com**
[2]جامعة الزاوية، الزاوية, ليبيا **i.salem@zu.edu.ly**

ملخص البحث

هناك اهتمام متزايد مؤخرًا بأجهزة تخزين الطاقة المرنة لتلبية المتطلبات المتنوعة للتطبيقات الحديثة، مثل الأجهزة الإلكترونية القابلة للارتداء. وبذلك، هناك حاجة كبيرة لاستخدام الطاقة بكفاءة وتطوير مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة وذلك لتسهيل التنمية المستدامة. يتم تصنيع أجهزة تخزين الطاقة المرنة لتوفير الطاقة بشكل ما يمكن نقله إلى حيث هو مطلوب والمحافظة عليها من حيث تأثير الخصائص الميكانيكية عليها. تشتمل على أجهزة التخزين الطاقة مثل البطاريات والمكثفات وخلايا الوقود والمكثفات مزدوجة الطبقة ذو مرونة فائقة على العديد من الأنواع من حيث درجة المرونة وقوة الأداء من شحن وتفريغ الطاقة. لهدا كل نوع من هده الأجهزة المرنة له مزايا وعيوب من حيث مراحل وطرق التصنيع المتعددة ابتداء من المواد الأساسية المستخدمة، الأداء والتكلفة والعمر الفعلي. تناقش هده الورقة ما توصلا ليه الباحتين من المكثفات مزدوجة الطبقة ذو المرونة الفائقة من حيث أصناف المواد المرنة المستخدمة في الأقطاب الكهربائية ومجمعات التيار، والكهرل، والركائز الأساسية للمراحل النهاية للتغليف، وأَيْضًا من حيث درجة احتفاظها وكيفية زيادة كثافة الطاقة للمكثفات الفائقة بناءً على تطوير المواد.

الكلمات المفتاحية: المكثفات فائقة المرونة، الأقطاب الكهربائية، المكثفات مزدوجة الطبقة، الكهرل, مجمع التيار.

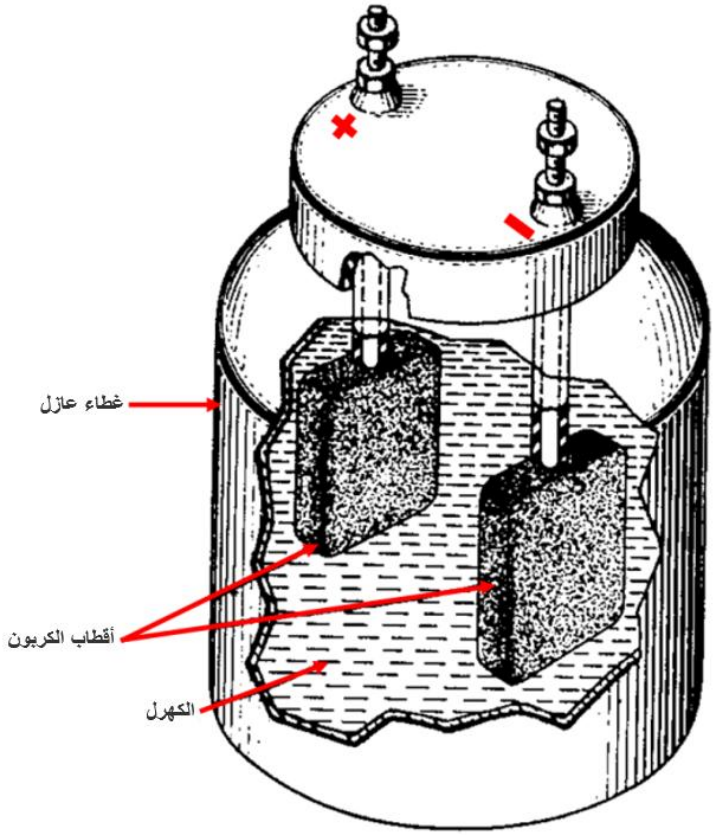
1. المقدمة

استنادًا إلى العمل الكهرو ستاتيكي، تعتبر المكثفات ضرورية في لوحات الدوائر والمنتجات الإلكترونية الأخرى بدلاً من البطاريات. يمكن أن تحل محل البطاريات وتعمل كبطاريات تكميلية في تخزين الطاقة الكهربائية عند الحاجة إلى توصيل أو امتصاص طاقة عالية. وأيضا يمكن أن توفر المكثفات الفائقة طاقة أعلى من البطاريات وتخزن طاقة أكثر من المكثفات التقليدية. فضلاً على ذلك، المكثفات التقليدية ثقيلة وضخمة، ولا يزال من الصعب تحقيق أجهزة تخزين طاقة عالية الكفاءة تتسم بالمرونة. في أوائل 1970، حققت شركة توكين (Tokin) اليابانية، إحدى الشركات الرائدة في مجال التكنولوجيا، تقدمًا كبيرًا في مجال المكثفات، وسرعان ما طورت تقنيات التصنيع، وبدأت في بيع المنتج إلى السوق كمكثف فائق الشحن والتفريغ. ألا انه، لا تزل تصنيع المكثفات الكهروكيميائية تتطلب تطويرًا كبيرًا فيما يتعلق بالمتطلبات الفنية والتطبيق العملي. تر كزهده الورقة على عمليات التصنيع المختلفة لمركبات المكثف فائق المرونة وكيفية زيادة كثافة الطاقة وتطوير المواد المستعملة في صناعته.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE

2. بداية المكثفات الفائقة

بالمكثفات فائقة Electric Double Layer Capacitor (EDLCs)عادة ما تسمى المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة
السرعة. ذكره برمان فون أول مرة مفهوم السعة ذات الطبقة المزدوجة في منت Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2023; Accepted 24 Oct. 2023; Published Online in ---- 2024
صف القرن الثامن عشر، ولكن المحاولة الأولى لتخزين الطاقة الكهربائية كجهاز كهربائي منخفض الجهد قام بها الباحث بيكر [1] كما هو مبين في الشكل (1)، تم تصنيع الجهاز الخلوي من قطبين كربون، وتم غمرهما وفصلهما في حمضا لكبريتيك والماء ككهرل عازل. وللحصول على شكل قطب كربوني دون أي انكسار ويتشقق في نهاية المطاف، طورت شركة (Standard Oil of Ohio Company) و Donald L. Boosبنجاح معجون كربون كهربائي مرن عن طريق خلط جزيئات الكربون المطحونة بدقة مع الكهرل لإنتاج المكتفات المرنة عن طريق ضغط العجينة إلى PSI 20000 لتشكيل الأقطاب الكهربائية المرنة.

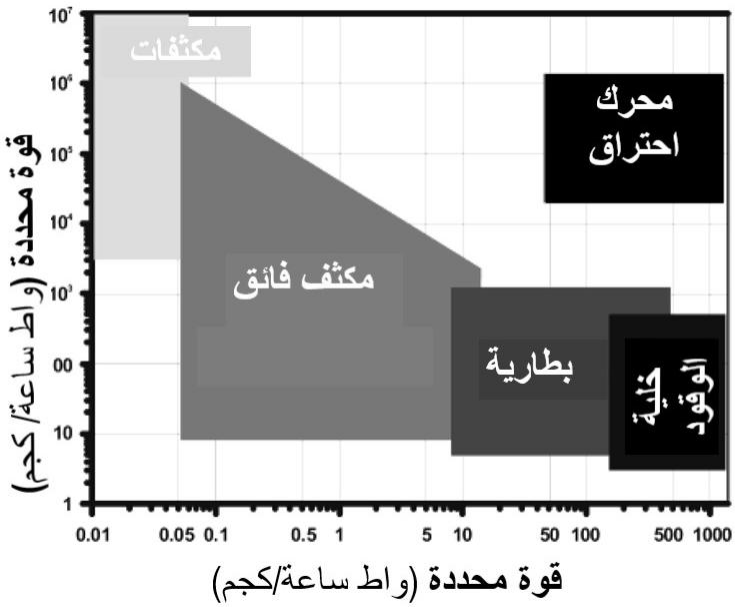


شكل (1): رسم تخطيطي لمبادئ المكثف [1]

تتزايد الحاجة إلى المكثفات فائقة المرونة بسرعة في الوقت الحالي، لأنها تلعب دورًا مهمًا في العديد من المجالات .[2-20] ويعد القطب أحد المكونات المهمة في المكثفات المرنة، وقد تم التحقق من ذلك بناءً على استخدام مواد مبتكرة وكانت المحاولات الأخيرة التي تم إجراؤها هي تحسين آليات تخزين الشحنات في المكتفات المرنة، لا سيما فيما يتعلق بمواد الأقطاب الكهربائية، مثل الجرافين، الناوية الكربونية أحادية الجدار(SWNT) ، الناوية الكربونية متعددة الجدران [2]، مركب الكربون نشيطٌ بالجرافين [3] ومن المسلم به في الصناعات الحالية أن أحدث مادة للأقطاب المستخدمة في إنتاج المكثفات الفائقة المرنة هو الجرافين.

أدخلت العديد من الشركات عدة أنواع من التكنولوجيا لإنتاج المكثفات غير المرنة ذات الأداء العالي جدًا. قدمت شركة ماكسويل Maxwell®، تقنية جديدة تسمىDuraBlue لتحسين أداء الاهتزازات. يمكن تعريف التقنية على أنها مزيج من قطب كهربائي جاف مع بنية خلوية مبتكرة، بعد ذلك، قدمت شركة Murata بتصنيع مكثف سيراميك متآلف من رقاقة لتعويض درجة الحرارة بقياس أقل من مليمتر في الحجم. ومع ذلك، فإن التحدي حاليًا هو أن معظم المكثفات تحتاج إلى أن تكون قليلة التكلفة أكثر بكثير من المكثف التقليدي أو بطارية الليثيوم التي تخزن نفس الكمية أو طاقة أعلى قبل استخدامها لاستبدال البطاريات في بعض المُعِدَّات الإلكترونية، مثل الهواتف الذكية أو السيارات الكهربائية.

يمثل استكشاف المواد المبتكرة ذات الأداء العالي للمكثفات فائقة المرونة لتلبية متطلبات التطبيقات المختلفة تحديات كبيرة. كما هو مبين في الشكل (2)، أظهر الباحث سولا ري [13] مقارنة المكثفات بمحرك الاحتراق الداخلي وخلايا الوقود والمكثفات التقليدية، مما يدل على أن المكثفات الفائقة يمكن أن توفر كثافة طاقة أعلى من خلايا الوقود والبطاريات، ولكن أقل قوة من المكثفات التقليدية.



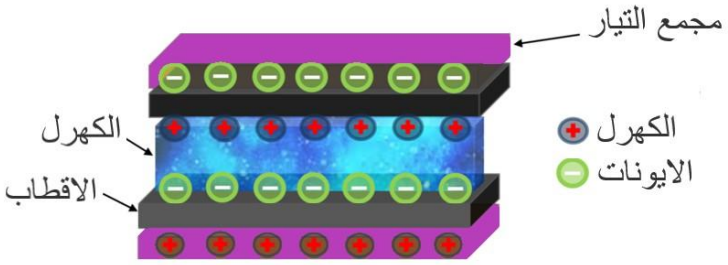
شكل (2): مخطط لمختلف مجالات تخزين الطاقة ومحركات الاحتراق [13]

3. المكثفات الكهربائية مزدوجة الطبقة(EDLC)

استنادًا إلى آلية تخزين الشحنة، تخزن المكثفات الطاقة بثلاثة أنواع أساسية من الآليات السعية، وسعة الأكسدة وأيضا المكثفات الهجينة. يستفيد المكثف (EDLC) من تخزين الشحنة الكهروكيميائية المستحدثة في الطبقة الكهروكيميائية المزدوجة من الكربون عالي المساحة، أي أنه يخزن الطاقة انطلاقًا من عملية فيزيائية لامتصاص الأيونات. تقدم EDLC كثافة طاقة أعلى واستقرارًا دوريًا ممتازًا من المكثفات الأخرى. [10] يمكن تقسيم EDLCs إلى أنواع مختلفة بناءً على مواد الأقطاب (الإلكترود)، مثل الكربون نشيطٌ، والأنابيب النانوية الكربونية، والبوليمر الموصلة، والمكثفات الفائقة القائمة على الجرافين. كل من المكثفات هذه لها نفس الآلية لتخزين الطاقة. تطبيق الجهد على قطبين يعني أن الأيونات يتم سحبها إلى سطح الطبقة المزدوجة، وتهاجر الأيونات المشحونة في الكهرل نحو الأقطاب الكهربائية ذات القطبية المعاكسة بسبب المجال الكهربائي بين القطبين المشحونين. هذا يعني أنه عند تطبيق تيار على EDLC، يتم إنشاء جهد والحفاظ عليه بين السطح وأيونات الكهرل ويتكوَّن من هيكل ينشأ عند استخدام قطب كهربائي مشحون بين المواد الهلامية؛ بعد ذلك، ستتشكل شحنة موازنة لسطح القطب الكهربي المشحون في الهلام بالقرب من السطح، وتسمى المسافة من

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
www.ejeee.elmergib.edu.ly Email: ejeee@elmergib.edu.lu Phone No:++218913748971 Copyright © 2024 EJEEE

السطح إلى الأيونات نظرية هيلمهوتز .يظهر بناء المكثف EDLC بشكل تخطيطي كما في الشكل (3). ويتكون المكثف من مجمعات التيار وقطبين من الأقطاب الكهربائية ويتم فصلها أو غمرها في مادة عازلة للكهرباء، التي تسمى بالكهرل.



شكل (3): رسم تخطيطي المكثفات الكهربائية المرنة مزدوجة الطبقة

1.3 المكثفات المرنة

تعد المكثفات المرنة EDLCs عالية المرونة والأداء الجيد أجهزة تخزين طاقة واعدة لتلبية المتطلبات العالية للإلكترونيات القابلة للارتداء، والشاشات المرنة، والعديد من التطبيقات التي تتطلب أن تتمتع EDLCs المرنة بكثافة طاقة عالية ومرونة عالية، وأن تكون خفيفة الوزن وسهلة التصنيع. وقد أنجز عمل كبير فيما يتعلق بتصنيع مراكز توزيع الكهرباء المرنة، وأحرز تقدم كبير. لذلك، يقدم هذا القسم أنواع المكثفات المرنة (EDLCs)ويعطي نبذة موجزة عن المواد المبتكرة والمتطورة المستخدمة في تصنيعها.

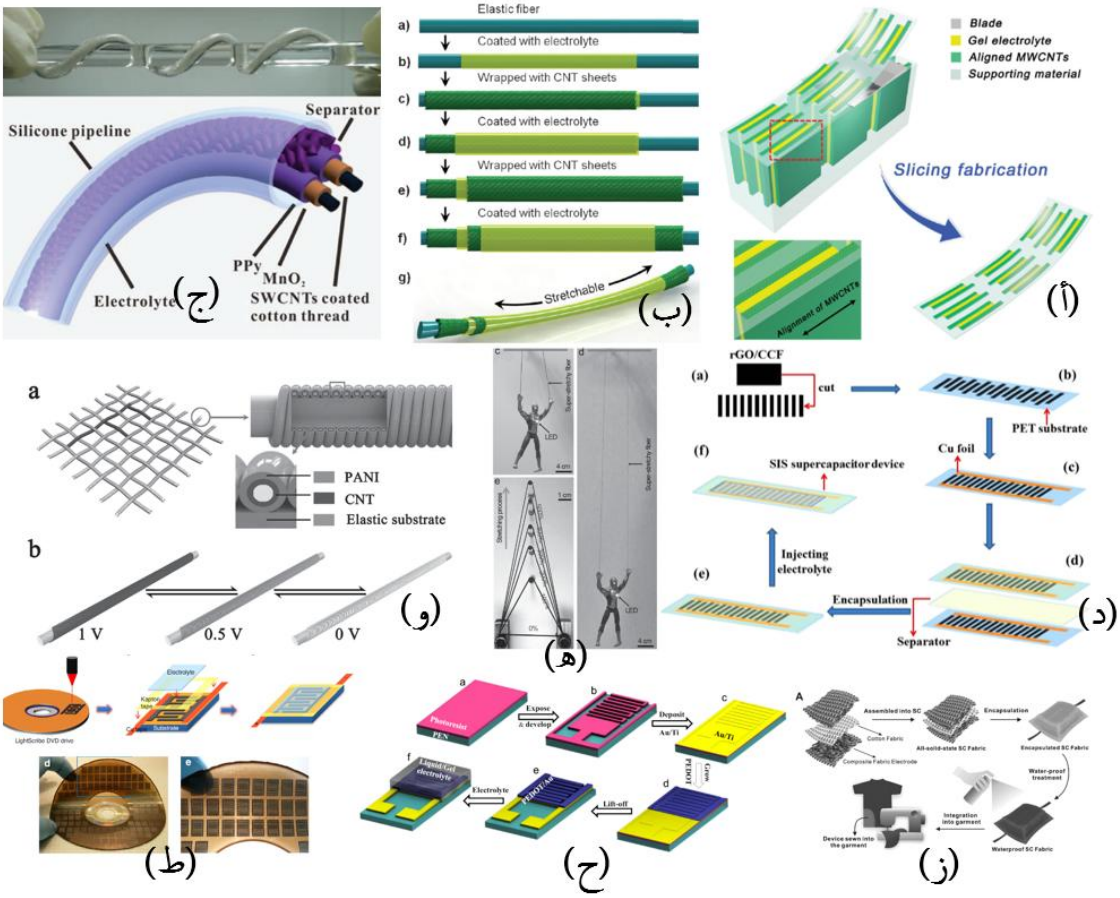
2.3 أنواع وتصميم المكثفات المرنة

بناء على آلية تخزين الشحنة، يمكن تقسيم المكثفات الفائقة إلى ثلاثة أنواع رئيسية من الآليات السعية: المكثفات مزدوجة الطبقة، والمكثفات الملفقة، والمكثفات الهجينة. يتضمن تخزين شحنة EDLCs عملية كهروستاتيكية وغير فارادية مقارنة بالمكثفات الملفقة، التي تشحن كهروكيميائيا التخزين (فأراد) بما في ذلك تفاعل الأكسدة والاختزال. تطبق المكثفات الهجينة (supercapattery) آلية تستخدم مزيجا من قطبين كهربائيين، مع قطب كهربائي واحد يعتمد على الطبقة الكهروكيميائية المزدوجة والآخر للمكثف. عادة ما يخزن المكثف الهجين الطاقة باستخدام مواد السعة الملفقة، مثل أكسيد معدن الأكسدة والاختزال أو بوليمر الأكسدة والاختزال في الأنود، بينما يستخدم الكاثود موادEDLC ، مثل الكربون [15]. عادة ما يتم تصنيف أنواع EDLCs بناء على مواد القطب؛ معظمها كربون نشيطٌ(AC) ، أنابيب الكربون النانوية، الجرافين ومركباته.

هناك استخدام واسع بشكل متزايد للمكثفات EDLCs المرنة، لأنها تحل محل البطاريات في بعض الأنظمة. وهكذا، بذل الباحثون والممارسون المهتمون الكثير من الجهد لتعزيز أداء وعملية تصنيع المكثفات الفائقة ولذلك، تم فحص العديد من التصاميم المعقدة وتقنيات التصنيع المختلفة، كما هو موضح في الشكل (4).

يعتمد تصميم أجهزة تخزين الطاقة على المكونات الرئيسية وأيضا على تصميمها الخارجي وعلى تقنية تصنيعها ولهدا تتطور تصاميم المكثفات فائقة المرونة بمرور الوقت ويوضح الشكل (4) (أ - ط) الأشكال المختلفة للمكثفات فائقة المرونة، مثل المكثفات على شكل ألياف [15]، ونوع الكابل [5]، وعلى هيئة ورقة [20]، وعلى هيئة فيلم رقيق وهو ما يعرف بتقنية النماذج الأولية السريعة التي لديها القدرة على تصنيع أجهزة تخزين الطاقة على أي تصميم مرغوب فيه تقريبا [4,3].

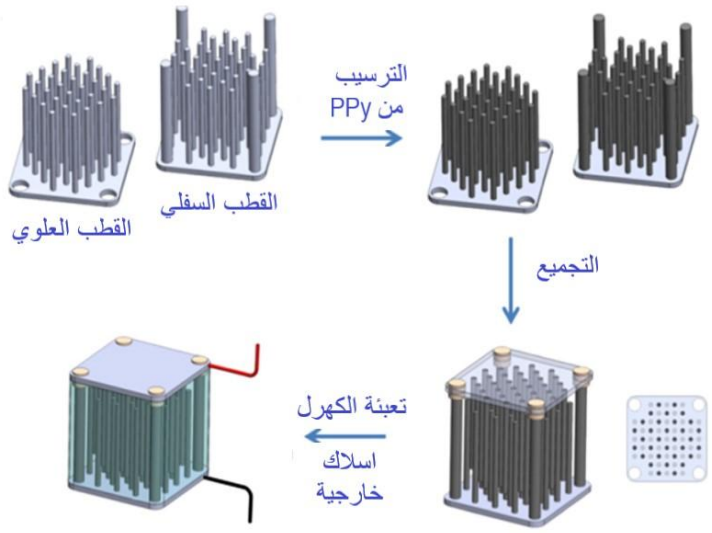
Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE



شكل (4): (أ) مكثفات فائقة رقيقة [4]، (ب) مكثف فائق على شكل ألياف[7] ، (ج) رسم تخطيطي للمكثفات الفائقة المرنة من نوع الكابل [5]، (د) هيكل شطيرة بين الأصابع [20]، (هـ) مكثف فائق على شكل ألياف مرنة[17] ، (و) مكثف فائق على شكل ألياف يمكن ارتداؤه [15]، (ز)مكثف مرن علي شكل أقمشة يمكن ارتداؤها [16]، (ح) MSCs مكثف مايكرو بوليمر [9]، (ط) MSCs مكثف مرن [3]

كما هو موضح في الشكل (5)، قام الباحث زهوا بتصنيع مكثفات فائقة متداخلة تعتمد على تقنية الطباعة بالذوبان الانتقائي بالليزر ثلاثي الأبعاد (SLM) لإنتاج أقطاب كهربائية ثلاثية الأبعاد من التيتانيوم [18]. استخدموا آلة طباعة تلاتيه الابعاد (3D) باهظة الثمن لطباعة مسحوق معدني كأقطاب كهربائية لتصنيع مكثف فائق لكنه غير مرن. إضافة إلى ذلك، استخدموا تقنية طلاء البوليمير PPyللحصول على سعة محددة تبلغ 10.1 فأراد / سم 3. لهذا عندما يصمم المهندسون مكثفات فائقة المرونة، ويقررون أشكالها ومكوناتها، يجب أن يكونوا على دراية بالعملية التي سيتم استخدامها لتصنيعها وعلى سبيل المثال، عند تصميم مكثف مرن، يجب مراعاة العديد من اللوغاريتمات، مثل خصائص المرونة لمكونات المكثف الرئيسية وأيضا الركيزة أو ما يعرف بهيكل المكثف. ولهذا يقدم القسم التالي أحدث المكونات الرئيسية المرنة التي تم استخدامها في المكثفات فائقة المرونة.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
www.ejeee.elmergib.edu.ly Email: ejeee@elmergib.edu.lu Phone No:++218913748971 Copyright © 2024 EJEEE



شكل (5): الخطوات التخطيطية المستخدمة لتصنيع المكثفات الفائقة ذات الحالة الصلبة [18]

3.3 مجمعات التيار المرنة

يرتبط الأداء العالي للمكثفات المرنة بالموصلية العالية والاستقرار الكهروكيمياوي والمرونة الممتازة لمجمعات التيار. تعتمد خصائص مجمعات التيار في المكثفات على اختيار الركيزة (الإطار)، وتصميم المكثف، وموصلية الأقطاب. مجمعات التيار المرن الأكثر استخداما هي الفولاذ المقاوم للصدأ، الذي يتميز بخصائص فائقة مقارنة بالأقمشة الأخرى. يعدّ الفولاذ المقاوم للصدأ مرشحا جيدا؛ على سبيل المثال، قام العلماء بتصنيع شريط مكثف مرن واستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ كمجمع تيار وإغلاقه بواسطة آلة تغليف للعمل في وقت واحد كإطار للمكثف [6]. ومع ذلك، فإن الفولاذ المقاوم للصدأ باهظ الثمن، وله سطح خشن، ويظهر عدم استقرار كيميائي. تؤدي الموصلية العالية للأقطاب الكهربائية النشطة إلى تجنب استخدامها كمجمعات تيار. يمكن أن تعمل الأقطاب الكهربائية كمواد نشطة ومجمعات تيار. استخدم الباحث زهانج مجموعة من نانو كربون مطليه على ألياف بوليمر مرن للعمل كمجمع تيار ومادة فعالة [17]. ومع ذلك، فإن الهدف هو تجنب استخدام مواد باهظة الثمن، على سبيل المثال، نانو الكربون، التي هي أيضا شديدة السمية للإنسان، أو الفولاذ المقاوم للصدأ، الذي له سطح خشن. تتمثل التحديات الحرجة في تصنيع المكثفات المرنة في اختيار مجمعات التيار القابلة للانحناء والصديقة للبيئة ذات خصائص ميكانيكية ممتازة والالتصاق العالي والتوصيل الفائق. أحبار الموصل أو المعاجين المتوفرة حاليا باهظة الثمن، وتتطلب معالجة حرارية، ولها مرونة محدودة ورابطة ضعيفة مع ركيزة الإطار، مثل البوليمرات الحرارية البلاستيكية. ذكر الباحث زهوا عن استخدام الحبر الفضي على سطح PET كمجمع تيار مرن باستخدام طريقة الطباعة بالشاش، مع أنّ PETمعرض للأكسدة وعادة ما يعتمد معجون جامع التيار المرن عالي الالتصاق وعالي التوصيل على اختيار المكتف.

4.3 الاقطاب كهربائية المرنة

الأقطاب كهربائية المرنة أعطت الباحثون مزيدا من الاهتمام لمواد الأقطاب النشيطّة لتحسين أداء السعة واستقرار الشحن والتفريغ. هذه المواد مثلا البوليمرات الموصلة، مثل Polypyrrole (PPy) و Polyaniline (PANI)وذلك بسبب الموصلية الكهربائية العالية (100(ş/cm والسعة المحددة العالية، تم استخدام هذه المواد لصنع أقطاب كهربائية في مكثفات فائقة المرونة. نظرا لضعف الاستقرار الدوري لبوليمرPPy والحركة البطيئة لنقل الأيونات، طور الباحث زهوا قطبا مركبا مطاطيا ومرن يعتمد على بوليمير PPy

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE

وأكسيد الجرافين(rGO) المختزل من بوليمير PANI [18].هو أيضا مرشح جيد للمكثفات فائقة المرونة ولا سيما عندما يتكون من الكربون المسامي. تتمتع البوليميرات PANI وPPy بميزة الاستقرار الدوري والتوصيل الكهربائي الممتاز. ومع ذلك، فهي بوليمرات باهظة الثمن وغير صلبه، وتظهر سطحا غير منتظم وغير أملس. استخدام بوليميرPPyعلى سطح نسيج قطني كقطب كهربائي هو عملية معقدة بسبب متطلبات البلمرة المعقدة، وقد تم نشر العديد من البحوث عن نشاط البروتون غير الكاف في الكهرل [16]. تتكون البوليميرات من مواد تمتلك سعة زائفة، حيث يستخدمان تفاعل الأكسدة والاختزال لتخزين الشحنة في الأقطاب، بينما السعة النوعية تكون عالية مقارنة بالمكثفات القائم أقطابها على الكربون. تستخدم تقنيات التصنيع الحالية للمكثفات فائقة المرونة بمواد للأقطاب تم تصنيعها خاصاً لتلائم عملية التصنيع بالطابعة ثلاثية الأبعاد. تم استخدام خمسة أشكال من الأقطاب الكربون في المكثفات فائقة المرونة مثلا الهلاميات الهوائية الكربونية، وألياف الكربون، وأسود الكربون والكربون الزجاجي، والهياكل النانوية الكربونية [8]. وقد أجريت العديد من الدراسات لتحسين استقرار السعة المحددة وكثافة الطاقة للمكثفات فائقة المرونة. لذلك، من الضروري تحديد الهيكل المركب لهذه المواد وغالبية هذه المواد تتكون من كربون نشيطٌ يتم مزجه عادة بكربون موصل جيد. يتوفر دليل شامل لوصف خصائص مادة الكربون ودورها في المكثفات الفائقة [6]. فإن أحد أعلى العوامل لاستخدام الكربون النشيطٌ للأقطاب الكهربائية هو الكربونات النشطة ذو المسامية العالية لأنها تحتوي على مسامات كبيرة وذو موصلية إلكترونية جيدة، وأيضا تكلفتها المنخفضة وسهولة تحضيرها وتصنعيها إلى أقطاب كهربائية التي يمكن التحكم فيها وتحويلها إلى هيئة سائل أو معجون هلامي.

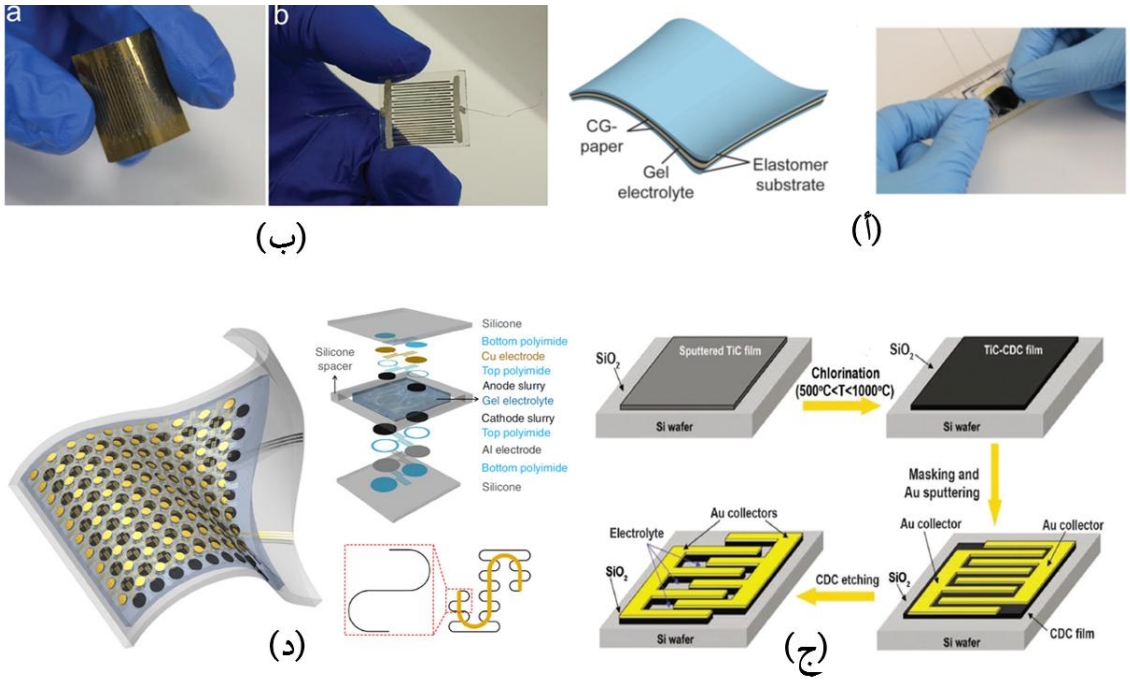
5.3 الكهرل الكهربائي المرن (الكتروليت)

يعد الكهرل مكونا مهما يلعب دورا مهما في أداء المكثفات المرنة. لهدا جذبت الدراسات في الخواص الكهربائية للإلكتروليت المائية والعضوية والبوليميرية الكثير من الاهتمام على مر السنين بسبب تطبيقها في المكثفات المرنة. تم استخدام إلكتروليت بوليمر هلامي بدلا من إلكتروليت عضوي في المكثفات المرنة نظرا لإعداده السريع وتكلفته المنخفضة. وهي مصنوعة عن طريق دمج حمض الأيونات في مصفوفة بوليميركحول البولي فينيل (PVA) وهو أحد البوليمرات الأكثر استخداما حاليا للكهرل في المكثفات المرنة وذلك بسبب خصائصه الميكانيكية الممتازة، مثل التمدد ألذى يصل مداه إلى 400٪ [17]. الكهرل البوليمير الهلامي (GPE) القائم على PVA يكون مستقر كهرومائية وحراريا، وله موصلية عالية وترابط جيد عند تغليفه بالكامل في المكثفات، مما يؤدي إلى الحد الأدنى من التسرب ودخول الهواء [14]. الكهرل الهلامي القائم على PVA قادر على اختراق بعض المواد لأقطاب الكربون، مثل صفائح الكربون النانوية. هذا يعني أن الأيونات الموجودة في الكهرل لا يمكن أن تنتشر بسرعة عند القطب في أثناء عملية الشحن والتفريغ. يؤدي استخدام البوليمر كمادة رابطة في الكهرل الهلامي إلى زيادة المسافة بين القطبين الكهربائيين. لذلك، فإن زيادة تركيز الكهرل وتقليل تركيز البوليمر يحسن معدل الانتشار وإمكانية الوصول إلى الاقطاب .إضافة تركيز الكهرل يزيد من سعة المكثفات ويقلل من قدرة التفريغ مما يدل على أن التركيز المنخفض يؤدي إلى موصلية أقل، ومما يؤدي إلى مقاومة أعلى وانخفاض أكبر في الجهد لاحقا [11]. فضلًا على ذلك، الفرق في المقاومة المكافئة(ESR) ، والمعروفة أيضا باسم المقاومة الداخلية للمكثف، التي يمكن حسابها من تقاطع التردد العالي للنصف الدائرة على المحور الحقيقي التي يمكن الحصول عليه من التحليل الطيفي للمقاومة الكهروكيميائية .(EIS) ليس فقط تركيز الكهرل ولكن أيضا سمك طبقته التي يمكن أن توثر على أداء المكثف [4]. إضافة إلى ذلك، قد تحتوي بعض مواد القطب الكربوني على بنية متوسطة منخفضة، مما يقلل من إمكانية وصول الكهرل ويزيد من المقاومة الداخلية للمكثف. يمكن أن تؤثر الطريقة التي يتم بها تصنيع أو تطبيق الكهرل في المكثفات على أدائه. أفاد مادو [10] آن المكثف فائق المرونة القائم على شبكة ثلاثية الأبعاد من شعيرات كربونية نشطة (NANOWHISKERS) وكهرل من محلول مائي من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) باستخدام طريقة الغزل الكهربائي يعطي أداء جيدا وله خصائص طاقة أعلى. وذلك لأن الكهرل يمكن أن يتخلل الأقطاب الكهربائية ويصبح رطبا وينتشر بسرعة. تم استخدام هذه الطريقة فقط بأقطار تتراوح من ميكرومتر إلى نانومتر .إنها ليست طريقة مكلفة وتستغرق وقتا طويلا فحسب، بل تعتمد أيضا على عدد كبير من اللوغاريتمات. لدى الكهرل البوليمير الهلامي نطاق جهد صغير من 0.7 إلى 1.1 فولت. لذلك يعتمد اختيار الكهرل البوليمير الهلامي على تطبيق المكثفات المرنة ويبدو أنها تلعب دورا في فصل الأقطاب الكهربائية، ويجب أخذ العديد من اللوغاريتمات والآليات الأخرى ذات الصلة في الاعتبار لوصف وفهم الخصائص الفيزيائية للكهرل البوليمير الهلامي وذلك للحصول على مكتف ذو أداء عالي لسعة المكثف.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE

6.3 الركائز المرنة (مواد التغليف)

النهوض العلمي الأخير في المكثفات المرنة هو إمكانية توليد كثافة طاقة عالية بخصائص ميكانيكية مختلفة، وكان هناك تحسن ملحوظ في مركبات المكثف من الأقطاب والكهرل ومواد التغليف. ومع ذلك، هناك بعض المشاكل المرتبطة بمواد التغليف فيما يتعلق بمرونتها. على سبيل المثال، غلاف الألومنيوم للمكثف غير مرن، ولا يمكن إطلاق سوى عدد محدود من مواد الكهرل[14] . إضافةً إلى ذلك، فإن المكثفات المرنة محدودة بخصائصها الميكانيكية، مثل قابلية الانحناء والتمدد. لذلك، توفر مواد التغليف المرنة حلا واعدا لأجهزة تخزين الطاقة. كما هو موضح في الشكل (6)، تم استخدام العديد من مواد التغليف للمكثفات، مثل ألياف كيفلر ونسيج النيلون ليكرا [19]، كما هو موضح في الشكل (6) (ج). استخدم يانج الركيزة غير التقليدية لرقاقة السيليكون وذلك للحفاظ على كثافة السعة 1.1 مللي أمبير / سم 2 تحت قابلية تمدد تصل إلى 300٪ [16]. ومع ذلك، فإن شريحة رقيقة من رقاقة السيليكون هي مادة امتصاص ضعيفة ولديها نقطة انصهار عالية.



شكل (6): ركائز مختلفة: (أ، ب) مكثفات على ركيزة PET وعلى الورق [19]، (ج) مكثف على رقاقة Si [16], (د) الجوانب في تخطيط البطارية وتصميمها على ركائز السيليكون [11]

يعد التطور السريع للإلكترونيات القابلة للارتداء والمرنة للاندماج في المكثفات أمرا بالغ الأهمية لتصنيعها وتطبيقها على ركائز مرنة، مثل الورق. المكثف المرن المطبق على ركيزة الورق هش ويحتاج إلى معالجة، مثل أن تكون مغلفة جيدا وليتم تغليفها وإغلاقها تماما. ومع ذلك، يمكن أن تؤثر آلة التغليف على سعة المكثف بسبب عملية التسخين. لذلك، هناك حاجة ماسة إلى مكثفات مرنة مع القدرة على الاحتفاظ بوظائفها أثناء عملية التصنيع في ظل اختبارات ميكانيكية مختلفة. قام الباحث كاي [12] بتصنيع مكثفات مايكرو مرنة باستخدام مزيج من تقنيات الكتابة المباشرة بالليزر والترسيب الكهربائي لأقطاب الكربون المتداخلة على أفلام بوليمير مرنة (PI) بسمك 125 ميكرومتر .(Kapton 500H) كابتون هو فيلم بوليميد تم تطويره بواسطة DuPont® في عام 1960. ومع ذلك، فإنه يحتوي على امتصاص عالي نسبيا للرطوبة ويحتاج إلى التنظيف بالماء والإيثانول قبل الاستخدام.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE

4. الخلاصة

أعطيت هده الورقة دراسة موجزة عن المواد المبتكرة والمتطورة المستخدمة في تصنيع مكثفات فايقة المرونة. أنواعها وتصميمها من مكثفات مرنة على هيئة ألياف وأنسجة. تم التطرق أيضا إلى المركبات المرنة للمكثف من جامع التيار، الأقطاب، والكهرل وأخير الركائز المرنة التي تم تطوريها إلى أن تكون قابلة للارتداء وذات تغليف جيد والمحافظ على أداء السعة واستقرار الشحن والتفريغ.

المراجع

[1] Becker, H.I., Gen Electric. (1957) 'Low voltage electrolytic capacitor', U.S. Patent 2,800,616.

[2] Ujjain, S. K., Ahuja, P., Bhatia, R. and Attri, P. (2016) 'Printable multi-walled carbon nanotubes thin film for high performance all solid-state flexible supercapacitors', Materials Research Bulletin, 83, pp. 167–171.

[3] Rezaei, B., Pan, J.Y., Gundlach, C. and Keller, S.S., 2020. Highly structured 3D pyrolytic carbon electrodes derived from additive manufacturing technology. Materials & Design, 193, p.108834.

[4] Cheng, M., Deivanayagam, R. and Shahbazian-Yassar, R., 2020. 3D printing of electrochemical energy storage devices: a review of printing techniques and electrode/electrolyte architectures. Batteries & Supercaps, 3(2), pp.130-146.

[5] Goli, H.R., Rao, M.B., Reddy, N.P., Pallavolu, M.R., Wu, P., Han, Y.K., Raju, G.S.R. and Alvi, P.A., 2022. Ternary metal oxysulfide-based 3D yarn electrodes for aqueous cable-type hybrid electrochemical cells. Chemical Engineering Journal, 446, p.137347.

[6] Karakurt, I. and Lin, L., 2020. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. Current Opinion in Chemical Engineering, 28, pp.134-143.

[7] Kim, J.G., Yu, H., Jung, J.Y., Kim, M.J., Jeon, D.Y., Jeong, H.S. and Kim, N.D., 2022. 3D Architecturing Strategy on the Utmost Carbon Nanotube Fiber for Ultra-High-Performance Fiber-Shaped Supercapacitor. Advanced Functional Materials, 32(28), p.2113057.

[8] Lee, S., Kim, J.G., Yu, H., Lee, D.M., Hong, S., Kim, S.M., Choi, S.J., Kim, N.D. and Jeong, H.S., 2023. Flexible supercapacitor with superior length and volumetric capacitance enabled by a single strand of ultra-thick carbon nanotube fiber. Chemical Engineering Journal, 453, p.139974.

[9] Li, L., Meng, J., Bao, X., Huang, Y., Yan, X.P., Qian, H.L., Zhang, C. and Liu, T., 2023. Direct-ink-write 3D printing of programmable micro-supercapacitors from MXene-regulating conducting polymer inks. Advanced Energy Materials, 13(9), p.2203683.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE

[10] Madhu, R., Periasamy, A.P., Schlee, P., Hérou, S. and Titirici, M.M., 2023. Lignin: A sustainable precursor for nanostructured carbon materials for supercapacitors. Carbon, 207, pp.172-197.

[11] Nguyen, T.K., Aberoumand, S. and Dao, D.V., 2021. Advances in Si and SiC materials for high-performance supercapacitors toward integrated energy storage systems. Small, 17(49), p.2101775.

[12] Cai, J., Lv, C. and Watanabe, A. (2017) 'High-performance all-solid-state flexible carbon/TiO 2 micro-supercapacitors with photo-rechargeable capability', RSC Adv. Royal Society of Chemistry, 7(1), pp. 415–422.

[13] Sorlei, I.S., Bizon, N., Thounthong, P., Varlam, M., Carcadea, E., Culcer, M., Iliescu, M. and Raceanu, M., 2021. Fuel cell electric vehicles—A brief review of current topologies and energy management strategies. Energies, 14(1), p.252.

[14] Alipoori, S., Mazinani, S., Aboutalebi, S.H. and Sharif, F., 2020. Review of PVA-based gel polymer electrolytes in flexible solid-state supercapacitors: Opportunities and challenges. journal of energy storage, 27, p.101072.

[15] Xie, P., Yuan, W., Liu, X., Peng, Y., Yin, Y., Li, Y. and Wu, Z., 2021. Advanced carbon nanomaterials for state-of-the-art flexible supercapacitors. Energy Storage Materials, 36, pp.56-76.

[16] Yang, J., Cao, Q., Tang, X., Du, J., Yu, T., Xu, X., Cai, D., Guan, C. and Huang, W., 2021. 3D-Printed highly stretchable conducting polymer electrodes for flexible supercapacitors. Journal of Materials Chemistry A, 9(35), pp.19649-19658.

[17] Zhang, R. R., Xu, Y. M., Harrison, D., Fyson, J., Qiu, F. L. and Southee, D. (2015) 'Flexible strip supercapacitors for future energy storage', International Journal of Automation and Computing, 12(1), pp. 43–49.

[18] Zhao, C., Wang, C., Gorkin Iii, R., Beirne, S., Shu, K. and Wallace, G.G., 2014. Three dimensional (3D) printed electrodes for interdigitated supercapacitors. Electrochemistry Communications, 41, pp.20-23.

[19] Zhao, W., Jiang, M., Wang, W., Liu, S., Huang, W. and Zhao, Q., 2021. Flexible transparent supercapacitors: materials and devices. Advanced Functional Materials, 31(11), p.2009136.

[20] Zhou, Q., Ye, X., Wan, Z. and Jia, C. (2015) 'A three-dimensional flexible supercapacitor with enhanced performance based on lightweight, conductive graphene-cotton fabric electrode', Journal of Power Sources, 296, pp. 186–196.

Submitted 13 Sep. 2024; Final Version Received 28 Oct. 2024; Accepted 24 Oct. 2024; Published Online in ---- 2024
 Copyright © 2024 EJEEE