٧ – ٣ – ٣ نظرية السعة باراكهربائية[١]

المكثفات الخطية ليست مثيرة للإهتمام حيث أن العلاقة بين الشحنة والجهد الكهربائى علاقة خطية٠ ولحسن الحظ يمكن وضع مواد شديدة التعقيد بين لوحى المكثف ومنها تتولد علاقات معقدة للغاية٠ المكثفات الغير خطية ذات أهمية حاسمة للمجتمعات حيث أنها تستخدم فى تصنيع أجهزة الإستشعار وأجهزة الضبط المتغير، المرشحات، ومحولات الطاقة٠

- إستعراض للمكثفات الخطية

يمكن شحن جميع المكثفات بتطبيق الجهد الكهربائى وقد سبق أن أشرنا فى معادلة سابقة أن إجمالى الشحنة يساوى سعة المكثف مضروبا فى الجهد٠ يمكن إعادة كتابة المعادلة كنسبة حيث مقدار السعة يمثل "الميل" للدالة

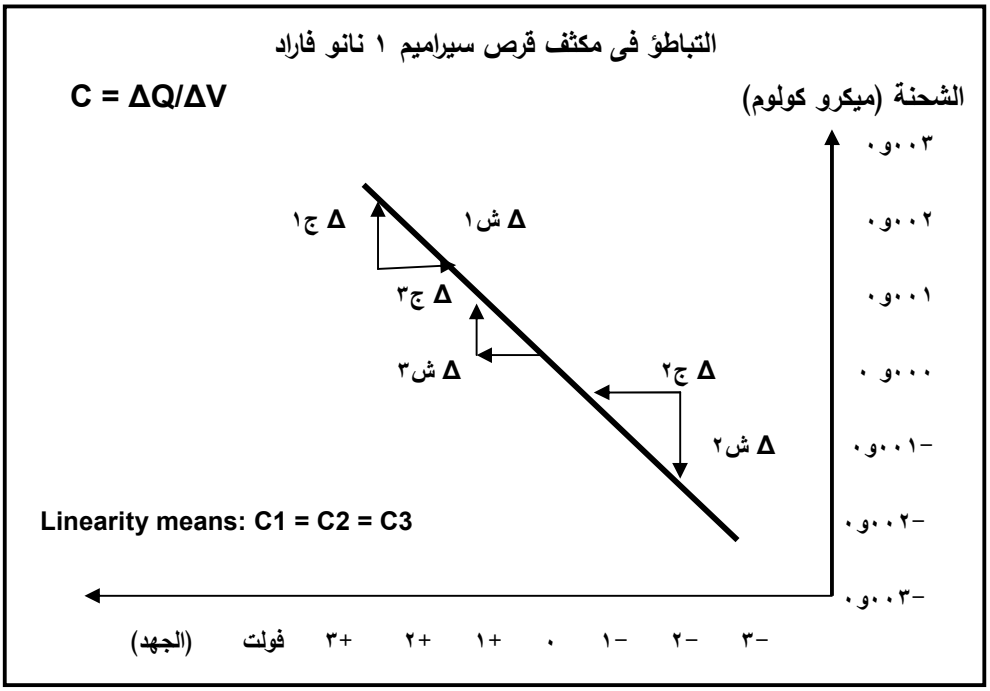
المعادلة (٧–١٦) $Q/V = C$

للتمييز بين العناصر الخطية والغير خطية نجد أن مقدار السعة فى العناصر الخطية ثابتة عند كل الجهود الكهربائية في درجة حرارة وضغط ثابت بعكس المكثفات الغير خطية٠ السبب في ذلك أنه لا يوجد أي مادة عازلة ذات علاقة خطية ماعدا الفراغ٠ يتغير المعامل الثابت النسبى لجميع المواد في المجالات الكهربائية العالية٠ كما تتغيير السعة عند درجات الحرارة العالية والجهود العالية – المعادلة (٧–١٠)

يتضح أن سمك المكثف جزء من المعادلة ٠ إذا تم شحن المكثف حتى قوة المليون نيوتن يتغير سمك المكثف وتزداد السعة بكمية صغيرة جداً٠ بزيادة درجة الحرارة، يزيد حجم المكثف بسبب معامل التمدد الحراري، مما يتسبب فى تغيير سمك المكثف ٠ تمثل ظاهرة الإحتكاك تعقيدا أكثر على سبيل المثال، يظهر قليل من "الاحتكاك" فى المكثف عند عملية الشحن والتفريغ وترتفع درجة الحرارة ، مما يتسبب فى تغيير السعة قليلاً٠

---

[١] قادرة المادة على الإحتفاظ بالاستقطاب الكهربائي في حالة عدم وجود تغية خارجية تسمى فيروكهربية (FE) ، عندما يتناقص الجهد الخارجى تستمر الشحنات المخزنة فى التناقص حتى تصل الى الصفر٠ لا تظهر هذه المكثفات الغير خطية أي استقطاب التباطؤ أو بقايا (hysteresis or remnant polarization) ، ومن ثم تسمى المكثفات بارا كهربائية (para–electric (PE) capacitors).



الشكل (٧-٥٦) الميل الخطي لمكثف ثابت لجميع الجهود الكهربائية

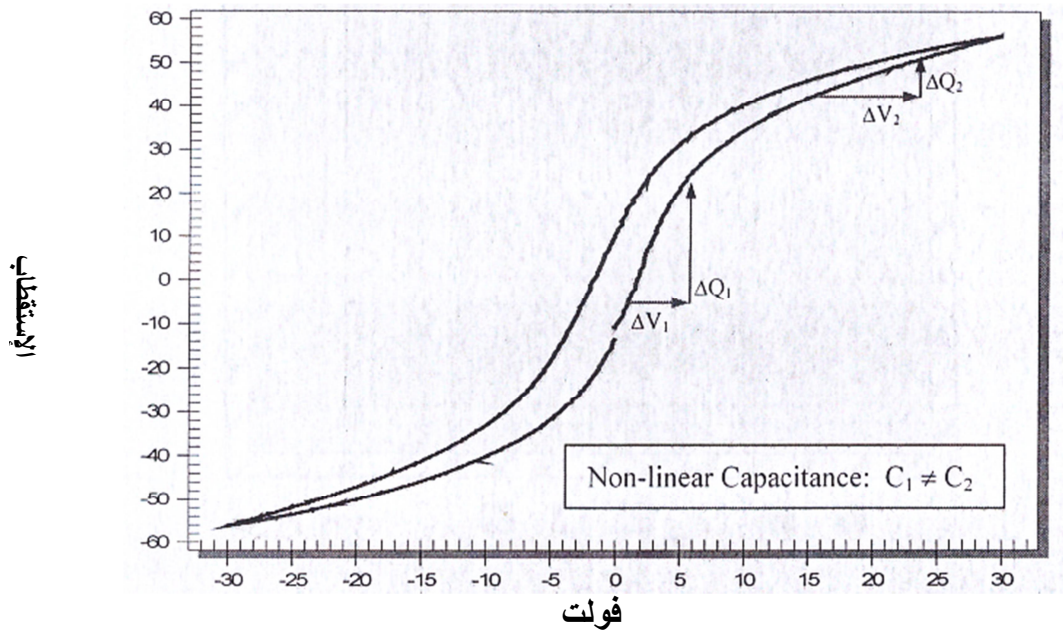
مع زيادة درجة حرارة المكثف بزيادة الجهد خلال المكثف، يتسبب فى إنخفاض منحنى الجهد مقابل الشحنة الى أسفل قليلاً عند كل زيادة للجهد المرتفع٠ وبطبيعة الحال، سوف يفقد المكثف الحرارة الزائدة والتى تؤثر فى العناصر والهواء المحيط بالمكثف وذلك فى حالة شحن المكثف ببطء٠ وقد تبين أن أى مكثف بمعامل ثابت عزل أكبر من ثابت عزل الفراغ لا يعتبر مكثف خطى٠ في واقع الأمر، فإنه من المستحيل تقريبا قياس ظاهرة الغير خطية النظرية لأن هناك حدوداً حقيقية لدقة القياس بسبب الضوضاء، والوقت، والحساسية٠ مكثفات المواد العازلة للكهرباء ولها ظاهرة الغير خطية بحكم طبيعتها تظهر تغييرات كبيرة لثوابت العزل وأن من السهل أن نرى ذلك في االمكثفات الحقيقية٠

- **المكثفات الغير خطية**

فى الشكل (٧-٥٧) مكثف بارايليكتريك نجد أن السعة تتغير مع الجهد؟ سبق أن تعرضنا عند مناقشة المكثفات الخطية أن الإرتفاع الثابت للمجال الكهربائى داخل المكثف يسبب فصل الإلكترونات٠ المواد العازلة المستخدمة فى المكثف فى الشكل (٧-٥٧) تشتمل على

عدد كبير من الذرات فى الكريستال في مساحة صغيرة جداً وتشتمل على ذرة التيتانيوم أو لانثانوم وبالتالى ليس هناك مساحة كبيرة تسمح بحركة الذرات للتعويض عند تطبيق مجال كهربائي مما يجعل معامل العزل لهذه المواد ذو قيمة كبيرة تتراوح من ١٠٠ الى ٣٠ ألف٠

مادة بلزت المشع

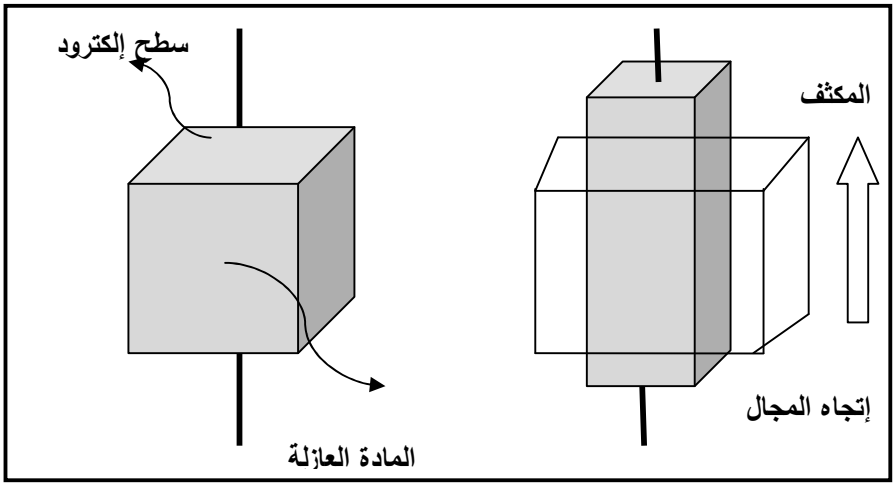


الشكل (٧-٥٧) منحنى لمكثف غير خطي يسمى مكثف بارايليكتريك.

علما أنه لا يوجد وحدات قياس لثابت العزل النسبي٠ عند تحرك الذرات في المجال الكهربائي، بعضها يتحرك نحو الجانب الموجب للمجال وبعضها يتحرك مبتعدا٠ ويوضح المنحنى عند قدر صغير من الجهد تبدأ حركة الذرات مما ينشأ مكثف (م١) ومع زيادة الجهد يتحرك ليعطى المكثف (م٢) كما هو موضح٠ مسألة أخرى في الشكل تظهر حلقة المنحنى مفتوحة ، وليست مغلقة٠ سبب هذا التأثير المعقد جداً قد يكون نتيجة لظاهرة الإحتكاك التى تحدث عند تطبيق المجال الكهربائى٠ المواد التي تظهر في الشكل (٧-٥٧) تسمى مادة "بارايليكتريك" وهو تحديد بشكل "S" الكلاسيكية في منحنى الجهد مقابل الشحنة٠هذه المواد الخاصة إختصار مصطلح بلزت[٢] ، الذي يرمز إلى مركب زركونات وتيتانات الرصاص

[٢] مصطلح بلزت (PLZT) هو مركب إستقطاب من تيتانات الرصاص والزركونيوم

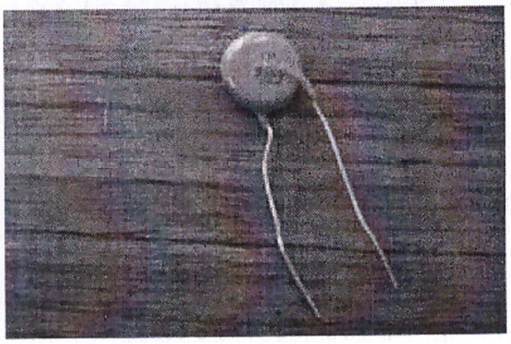
المستقطبة وبإضافة كميات صغيرة من مادة الشولئب مثل لانثانوم إلى الخليط يمكن التحكم فى خصائص الخليط النهائية وتستخدم في صناعة الإلكترونيات، وأجهزة الإستشعار ٠



الشكل (٧-٥٨) مكثف غير خطى

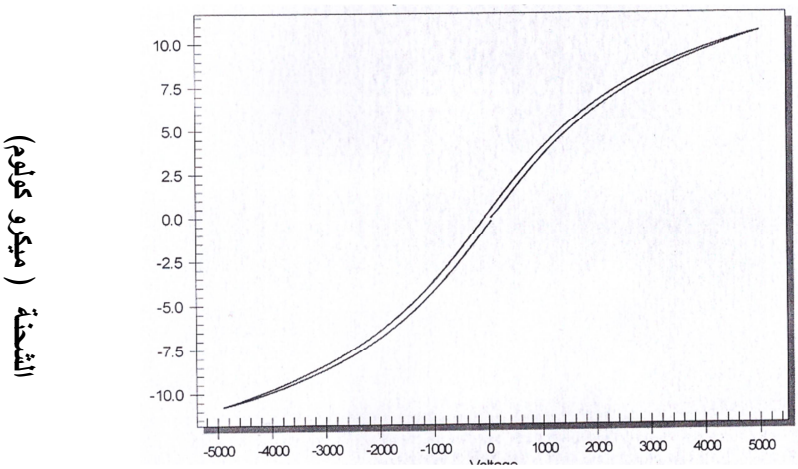
إضافة مادة لانثانوم هى التى تسببت فى تغيير مادة المكثف من فيروالكتريك التى تستخدم فى صناعة الذاكرات الى مادة بارالكتريك التى تفقد الخاصية فى صناعة الذاكرات ٠ مركبات بلزت السابق توضيحها تتأثر بسرعة كهربائيا ٠ التغيير في السعة يعني تغيير فى ثابت العزل مع الجهد المطبق ٠ تغيير سرعة الضوء من خواص مركبات بلزت مع الجهد المطبق وبالتالى تستخدم فى عناصر معدلات الضوء ٠ يتم إستخدام مادة أخرى من مواد بارايليكتريك، مثل "نيوباتي الليثيوم" لتصنيع المعدلات الكهرضوئية التي تغذي المعلومات في الألياف الضوئية التي تشكل العمود الفقري لشبكة الإنترنت ٠ نجد الميل فى المنحنى لمكثف بارايليكتريك ليس ثابت، بمعنى أن السعة تتغير كدالة للجهد ٠ بإستخدام حساب التفاضل والتكامل، يمكن حساب الميل فى نتائج البيانات المقاسة عند كل نقطة قياس ورسم الميل مقابل الجهد ٠ الشكل (٧-٦٠) يوضح قياس التباطؤ لمكثف تجاري عالي الجهد قادر على تحمل ست آلاف فولت والذى يستخدم فى جهاز في دوائر التحكم للتصنيع ٠ صورة لهذا مكثف خاصة في الشكل (٧-٥٩) ٠ لاحظ أن الجهد الأقصى للإختبار في الشكل (٧-٥٩) هو ٥٠٠٠ فولت ٠ في الشكل (٧-٦١) منحنى العلاقة بين السعة مقابل الجهد كدالة لنفس

العينة يوضح الشكل (٧-٦١) ميل التباطؤ عند كل الجهد في الشكل (٧-٦٠)٠ الشكل (٧-٦١) يوضح الدالة باراليليكتريك٠

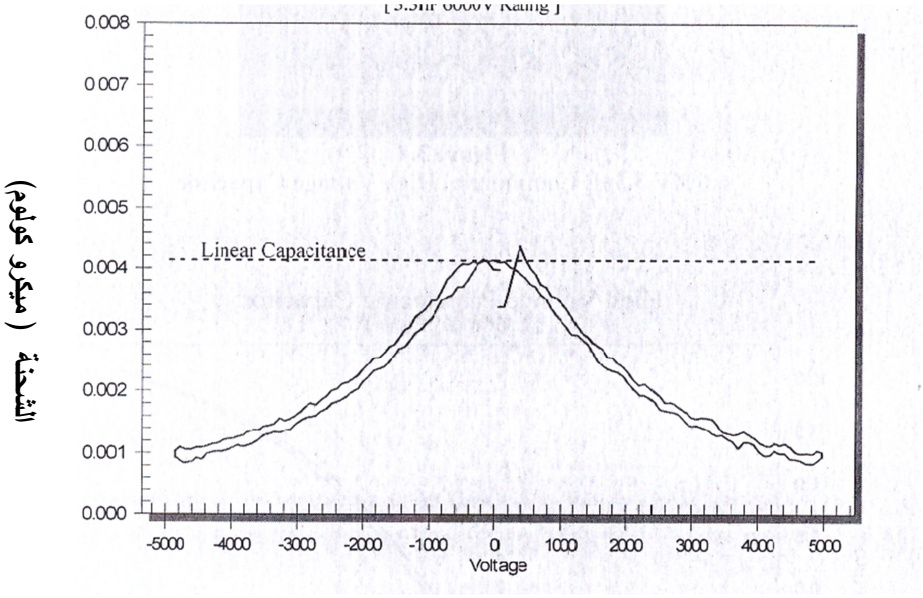


الشكل (٧-٥٩) مكثف تجاري عالي الجهد ٦٠٠٠ فولت – ٣و٣ نانو فاراد

يمثل الخط المتقطع منحنى المكثف الخطي على نفس الرسم البيانى٠. ويظهر على شكل خط أفقي لأن سعة المكثف لا تتغير٠ تتغير سعة المكثف باراليليكتريك عندما يبدأ فعلا عند ٤ نانو فاراد ينخفض بعد ذلك إلى ١ نانو فاراد عند ٥٠٠٠ فولت ٠ لماذا تستخدم مكثف باراليليكتريك بدلاً من المكثف الخطي عندما يكون المكثف الخطي ثابت؟والسبب هو أن المواد العازلة للكهرباء التي تعمل بطريقة خطية عادة ما يكون معامل العزل منخفض٠ معامل العزل النسبى للمواد باراليليكتريك كبير جداً يقترب في بعض الأحيان ٣٠,٠٠٠ ٠ للحصول على قيمة السعة المطلوبة، نجد أن المساحة المطلوبة للمكثف الخطى مئات أو حتى آلاف المرات أكبر من مساحة المكثف المصنع من مواد باراليليكتريك٠ ويعتبر هذا غير عملى٠



الشكل (٧-٦٠) ٥٠٠٠ فولت تباطؤ فى مكثف تجاري عالي الجهد



الشكل (٧-٦١) قياس السعة مقابل "ادالة لجهد " المكثف في الشكل ٥.٣

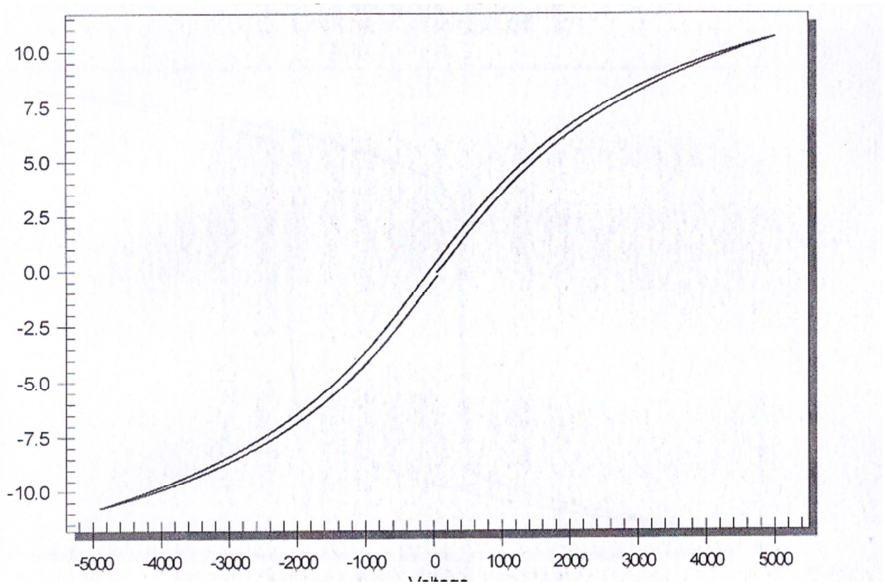
٧-٣ -٤ نظرية مكثفات الفيروكهربائية [١٢]

يمكن تعريفها بأنها المكثفات المصنعة من المواد الفيروكهربائية التى لها القدرة على اللإحتفاظ بالإستقطاب الكهربائي في حالة عدم وجود مجال خارجى، أبرز سمات مواد الفيروكهربائية تباطؤ الإستقطاب ولها درجة حرارة حرجة ، بحيث فى درجات حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة تفقد المواد الفيروكهربائية خصائصها لتصبح مواد بارا كهربائية ٠ يمكن تعريف مكثف الفيروكهربائية كمكثف بارايليكتريك مع أقطاب تحويل دائمة لإضافة "ذاكرة". والنتيجة مكثف فيروكهربية[٣]. يمكن الحصول على مكثف فيروكهربائية بوضع مادة فيروكهربائية بين لوحين معدنيين وتستخدم فى عدة تطبيقات منها الذاكرة وأجهزة الإستشعار الميدانية/الضغط/درجة الحرارة٠ توضح العلاقة بين مكثف فيروكهربية في الشكل (٧-٦٢) ومكثف بارايليكتريك الشكل (٧-٦١) عن طريق منحنى السعة مقابل الجهد للمكثفين٠

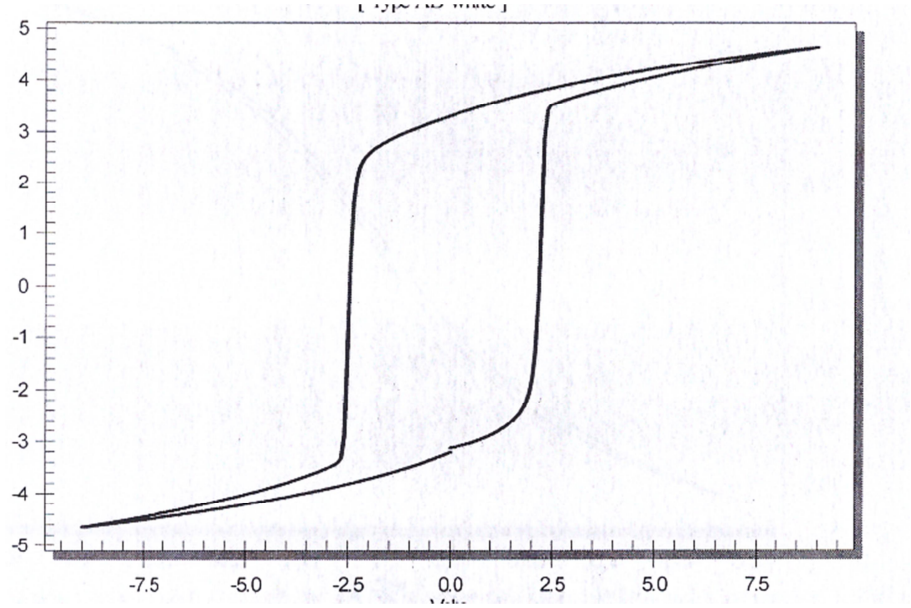
---

[٣] فيرروكهربية هى خاصية لبعض المواد التي لها إستقطاب كهربائي عفوي التي يمكن عكسها بتطبيق مجال كهربائي خارجي٠ المصطلح يستخدم في القياس خاصية الفيروماجنيتيسم، فيه مادة لها سلوك مغناطيسي دائم٠ المطلح فيرو يعنى حديد كن يستخدم لوصف الخواص وعلى الرغم من حقيقة أن معظم المواد فيروكهربية لا تحتوي على الحديد٠

مكثف بارايليكتريك عالي الجهد (٣و٣ نانو فاراد تصنيف ٦٠٠٠ فولت)



الشكل (٧-٦٢) مكثف بارالكتريك

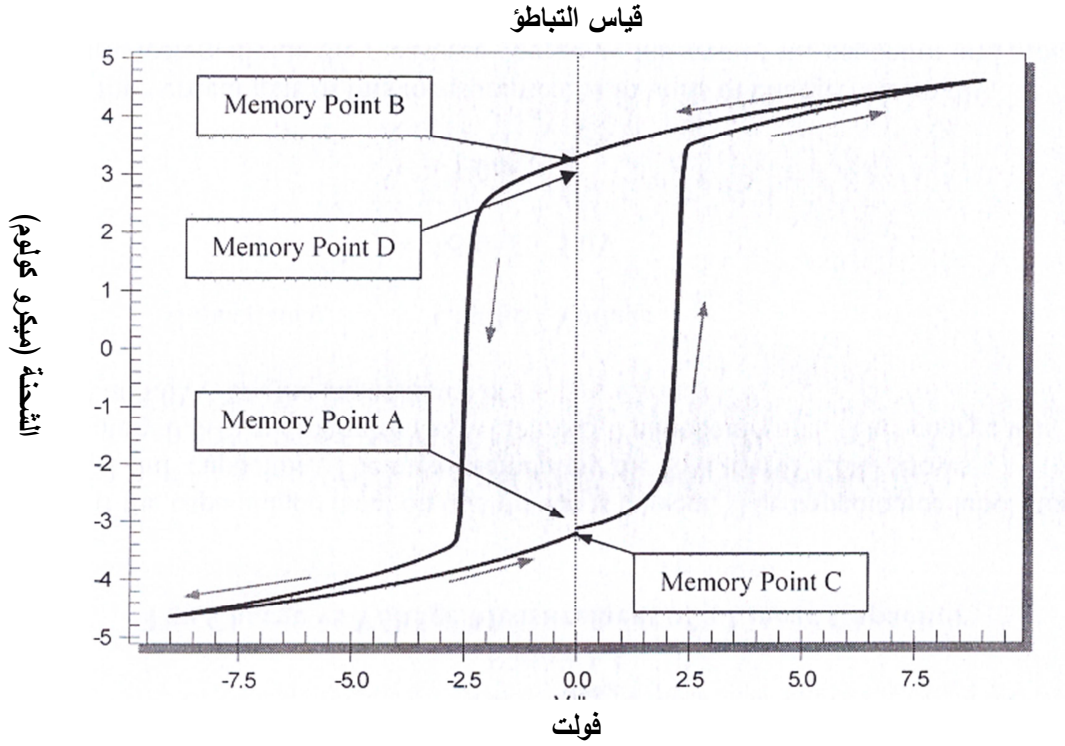


الشكل (٧-٦٣) التباطؤ فى مكثف فيروكهربائى قياسى مشع

يشتمل المكثف فيروكهربائى في الشكل (٧-٦٢) على "الذاكرة"، حيث أنه عند نقطة صفر فولت، تظهر حالتين من الإستقطاب التى لا تعود إلى الصفر على عكس مكثف بارا كهربائية فى الشكل (٧-٦١) الذى يعود الى قيمة صفر الإستقطاب في نهاية التشغيل لذلك

هو ليس بمكثف خطي٠ المكثف فيروكهربائى في الشكل (٧-٦٤) ، يعد نسخة من الشكل (٧-٦٢) عند صفر فولت، فإن الحلقة تشتمل على ثلاث نقاط رئيسية على محور الشحنة، أيا منها ليست عند صفر الإستقطاب.

الذاكرة عند النقطة (أ) هى نقطة إنطلاق المكثف بعد آخر تشغيل٠ هذا يعني أن النقطة (أ) هى حالة الشحن الأخير للمكثف الذى قد يكون منذ بضع ثوان أو فى اليوم السابق٠ وفي هذه الحالة، فإن العملية الأخيرة تركت المكثف في حالة تفريغ "كامل٠ حلقات التباطؤ تتحرك دائماً عكس إتجاه عقارب الساعة٠ الأسهم في الشكل (٧-٦٤) تشير إلى إتجاه إستجابة الشحنة عند زيادة الفولت من الصفر الى +٩ فولت ومن +٩ فولت الى الصفر فولت ومن الصفر الى -٩ فولت ، وأخيراً العودة إلى صفر فولت ٠الذاكرة عند النقطة (ب) هى حالة شحن المكثف عندما يمر خلال نقطة الصفر فولت بينما يتغير الجهد من + ٩ فولت إلى – ٩ فولت ٠



الشكل (٧-٦٤) الذاكرة في مكثف فيروليكتريك

نقطة الذاكرة (ج) هى النقطة الأخيرة فى القياسات٠ لاحظ أن نقطة (ج) لا تنتهي عند النقطة (أ) ، تاركاً "فجوة" في الحلقة وتحدث بسبب الذاكرة المؤقتة التى إضمحلت في بضع ثوان٠ إذا تم قياس حالة المكثف مرة أخرى مباشرة بعد تلك الثوان، سوف نجد أن الحلقة تبدأ مرة أخرى في النقطة (أ)٠ كملخص، القياسات +٩ فولت (تعنى أن القياس بدأ عند النقطة صفر فولت وتحرك إلى النقطة +٩ فولت أولاً) وينتهى عند نقطة (ج) ولكن بعد القياس فإن شحنة المكثف تضمحل إلى النقطة (أ) وتبقى هناك، حتى التشغيل التالى٠

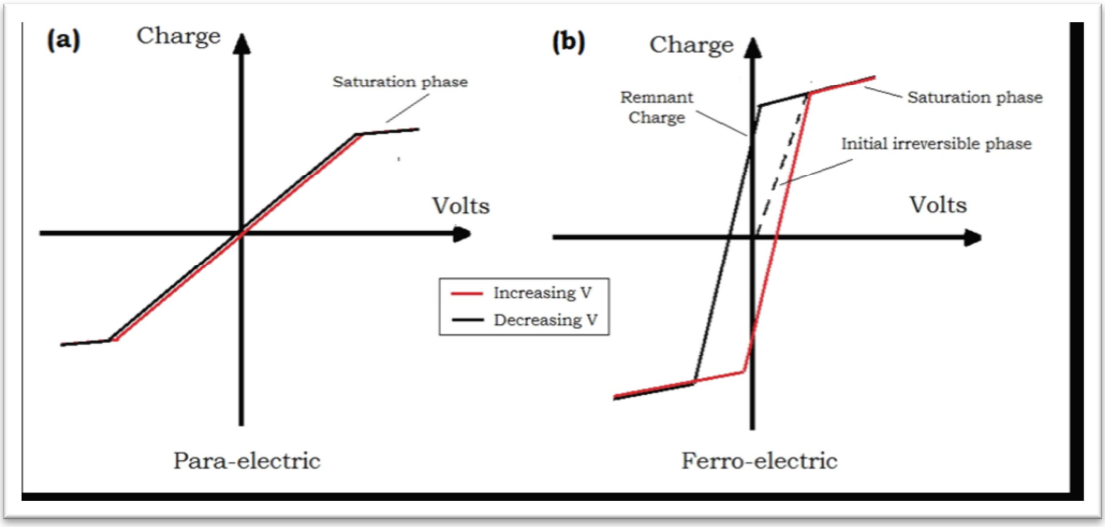
هنا مفهوم هام جداً. داخل المكثف الخطي، عندما نتحرك من الصفر فولت إلى +٩ فولت ثم العودة إلى الصفر فولت ، فبقدر قيمة الشحنة التى دخلت المكثف تخرج منه٠ يبدأ المكثف ويتوقف عند نقطة الشحن صفر٠ في مكثف فيروكهربائية ، إذا بدأنا عند نقطة الصفر فولت في النقطة (أ) والتحرك إلى النقطة +٩ فولت ، ومن ثم العودة إلى الصفر فولت فإن المكثف يقف في نهاية المطاف في النقطة (ب)٠ إذا كان علينا البقاء عند نقطة الصفر فولت بدلاً من التحرك على طول الطريق والعودة إلى نقطة (ج) ، سوف تضمحل شحنة المكثف قليلاً من النقطة (ب) إلى النقطة (د) في الشكل (٧-٦٤) والبقاء هناك٠ تخرج شحنات أكثر من المكثف عندما نتحرك إلى نقطة +٩ فولت من الصفر فولت بالمقارنة بالعودة الى نقطة الصفر فولت٠ الشحنات الفائضة تبقى خارج المكثف، بمعنى أن هناك شحنات زائدة بقطبية معاكسة داخل المكثف٠ وهذا هو جوهر الذاكرة ، ومدى أهمية المكثفات الفيروكهربائية لخصائصها الفريدة والمفيدة٠ السعة الكهربائية هي قدرة المادة (عادة ما تكون مادة عازلة) لإحتواء طاقة إلكتروستاتيكية عن طريق خاصية الحث بالإستقطاب الجوهري، الناتج من محاذاة روابط الذرات الهيكلية تحت تأثير المجال الكهربائي الخارجي٠ بتغير بسيط فى الجهد (المولد للمجال الكهربائى) يتسبب فى الإثارة للإتجاهات الخطية ثنائية القطب فى الشكل البلورى للمادة ، مما تتسبب فى تراكم الشحنات[٤] عن طريق ثابت التناسب (السعة المحددة). يعتمد مقدار السعة على هندسة المكثف التى تحكم معظم وظائف

[٤] الشحنة على لوحات مكثف والاستقطاب الجوهري المرتبط بمساحة السطح A (A: Q = P)

المكثفات العادية. ومع ذلك، إذا زادت قوة المجال بشدة تتواصل المحاذاة فى الزيادة حتى تصل قيمة تشبع، وبعدها تصبح السعة صفراً. عند هذه النقطة، ينحرف النظام بقوة من السلوك الخطي، الى تعريف جديد من السعة بشكل تفاضلي:

$$C = {}^{dQ}/_{dV}$$ المعادلة (٧-١٨)

عندما يتم تخفيض الجهد الخارجي، تتواصل الشحنات المخزونة فى التناقص حتى تصبح صفر (عندما يكون الصفر). هذه المكثفات الغير خطية لا تظهر أي تباطؤ أو بقايا إستقطاب ، كما هو الحال في الشكل (٧-٦٥ أ) ، ومن ثم تسمى المكثفات البارا كهربائية .

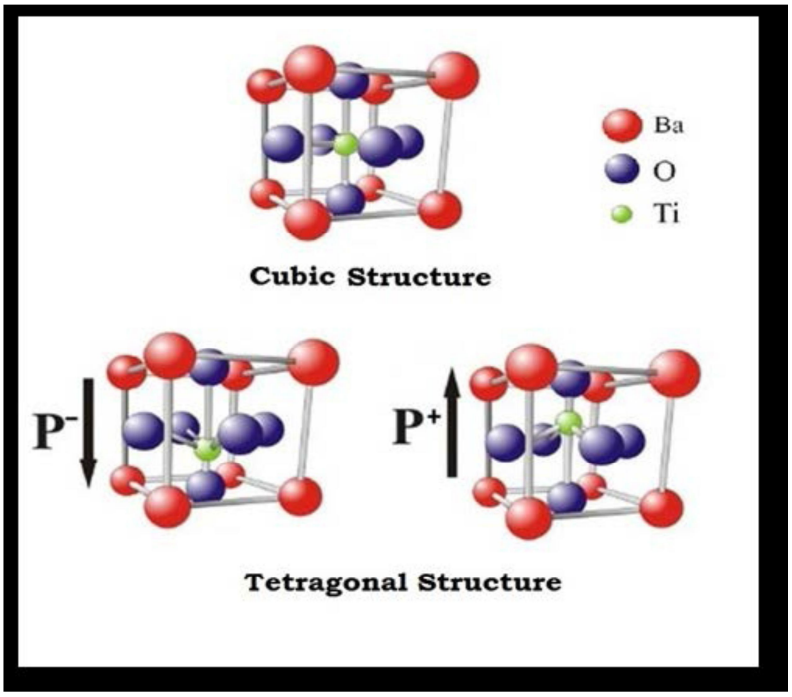


الشكل (٧-٦٥) تطور الشحنات المتولدة مع تغيير الجهد (أ) للمكثفات الباراكهربية (ب) للمكثفات الفيروكهربية

يوضح الشكل (٧-٦٥ ب) إستجابة الشحنات فى المواد الفيروكهربائية الى تغير الجهد، هذه الظاهرة نابعة من الإقتران القوي بين الخصائص الهيكلية وخصائص العزل للمواد الفيروكهربائية ؛ تخضع بعض المواد المعينة لتحول هيكلي، على سبيل المثال يتحول الشكل البلورى في مركب "تيتانات باريوم" من التكوين التكعيبى في درجات الحرارة العالية الى تكوين تيراجونال عند درجات حرارة منخفضة ؛ ينشأ هذا التحول فى تكوين البلورة للمادة بعبورة في الطاقات الحرة[٥] في درجة حرارة ١٢٠ درجة مئوية (وتسمى أيضا درجة حرارة حرجة). بسبب

[٥] يمكن أن يتوقف هذا الاختلاف على أطياف الطاقة للوسائط الإلكترونية وأنماط الفونونيك المسموح بها

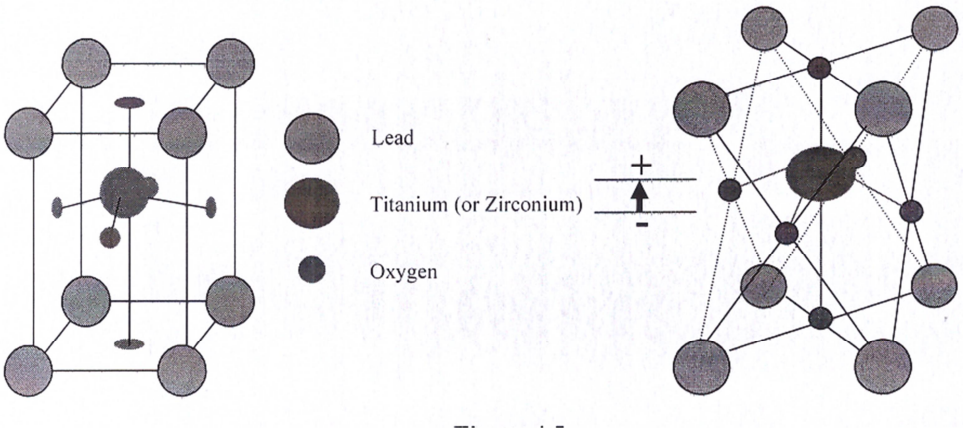
هذا التحول الهيكلي، يتكون ثنائي قطب غير متلاشى في وحدة الخلية، مما يؤدي إلى إستقطاب عينى (موجود حتى في غياب المجال الخارجي). تظهر بقايا تيتانات باريوم كثيرة نتيجة لظاهرة الإستقطاب والتباطؤ المستخدمة فى تطبيقات عناصر الفيروكهربائية٠ الشحنات المتبقية فى مكثف الفيروكهربائية لا تعود إلى نقطة الصفر فولت على عكس المكثفات الخطية ومكثفات بارا كهربائية٠ وهناك شحنات داخل المكثف التى لن تخرج بسبب أن الإلكترونات الزائدة داخل المكثف تتنافر مع بعضها ، مما يتسبب فى شحن المكثف بقدر من الجهد إلا إذا كان فارغاً٠ مكثف الفيروكهربائية في الشكل (٧-٦٢) ليس فارغ ولكن حتى الآن لا تزال قيمة الشحن تساوى صفر فولت٠



الشكل (٧-٦٦) الشكل التكوينى التكعيبى وهياكل تيتراجونال لمركب "تيتانات باريوم"

والسبب أن المواد الفيروكهربائية بين لوحى المكثف تحتوي على مجال كهربائي مدمج طبيعيا٠ يسحب المجال الكهربائي قدر من الشحنات الزائدة ذات قطبية معاكسة لإلغاء نفسها على سطحى المكثف٠ ولذلك، على الرغم من أن الشحنات الزائدة في كل من لوحى المكثف تتنافر مع بعضها ، فإنه ينشأ مجال كهربائي منبثق من المواد الفيروكهربائية ٠

في تفسير معامل العزل النسبي ، عندما يتم وضع أي مواد بين لوحى مكثف ثم يتم شحن المكثف ، يتسبب المجال الكهربائي بين اللوحات في فصل ذرات المواد العازلة للكهرباء إلى قطبان٠ عند إزالة المجال الكهربائى تعود الذرات الى حالتها السابقة قبل فصل عناصرها٠ الآن دعنا نفترض أن بعض هذه العناصر المستقطبة لها خاصية "تأمين مركزى مفرط" مما لا يمكنها من العودة إلى الصفر٠ وفي هذه الحالة، فإن المجال الكهربائي الناشئ يتواجد دائما ويظل المكثف مشحون حتى إلغاء هذا المجال الكهربائي المتبقى٠ وهذا هو الوضع في مركبات مواد الفيروكهربائية (ب ز ت)[١٧] . حيث تشتمل على العديد من الذرات محشورة في مساحة صغيرة التي لا تتناسب مع شكلها البلورى٠أحد هذه الذرات مؤمنة وضعها إلى "أعلى" أو "أسفل". وهناك وجهتى نظر للشكل البلورى (ب ز ت) ، تسمى بنية بيروفسكيتي[٦]، كما في الشكل أدناه٠



الشكل (٧-٦٧) نوع واحد من الأشكال البورية لمواد الفيروكهربائية

يوضح المخطط على اليسار مربع تقليدي للشكل البلورى بيروفسكيتي. يجب ملاحظة أمرين:

١. وحدة الخلية عمودية أطول قليلاً مما عليه للجانبين

٢. مركز ذرة التيتانيوم لا يقع فى متوسط الوحدة البورية٠

[٦] بيروفسكيتي هى أي مادة من نفس النوع من البنية بلورية

يوضح المخطط على اليمين كيف تتشكل الروابط بين ذرات الخلية٠

يمكن الحصول على المكثفات بطريقتين:

- المنطقة المفرغة فى وصلة شبه موصل تمثل مكثف بقيمة كثافة قصوى ٤٠٠ بيكوفراد – وجهد إنهيار يتراوح بين ٥ الى٢٠ فولت ونسبة تفاوت تصل الى ± ٢٠%٠
- ترسيب فيلم من ثالث أكسيد الألومنيوم على رقاقة يمثل مكثف بقيمة كثافة ٥٠٠٠ بيكو فراد – وجهد إنهيار يتراوح بين ٢٠ الى٣٠ فولت – كما أنه غير مستقطب٠

يمكن أن تتكون المكثفات من طبقات منفصلة من بولي- سليكون بمادة عازلة حيث يؤدي إستخدام الطبقات العازلة بسماحية عالية وزيادة السعة دون زيادة مساحة٠ معظم المكثفات الحديثة توفر المساحة بإستخدام خنادق عميقة، بنسب العرض إلى الارتفاع٠ في رقائق ذاكرات الوصول العشوائي الرقمية[٧]،

الشكل (٧-٦٨) وحدات "ذاكرة الوصول العشوائي الديناميكية المتزامنة"،

[٧] ذاكرة الوصول العشوائي (RAM) نموذج لتخزين البيانات على جهاز الكمبيوتر.٠ تسمح عناصر البيانات بوصول عناصر البيانات إليها (كتابه او قراءة) في الغالب نفس مقدار الوقت بغض النظر عن الموقع الفعلي للبيانات داخل الذاكرة

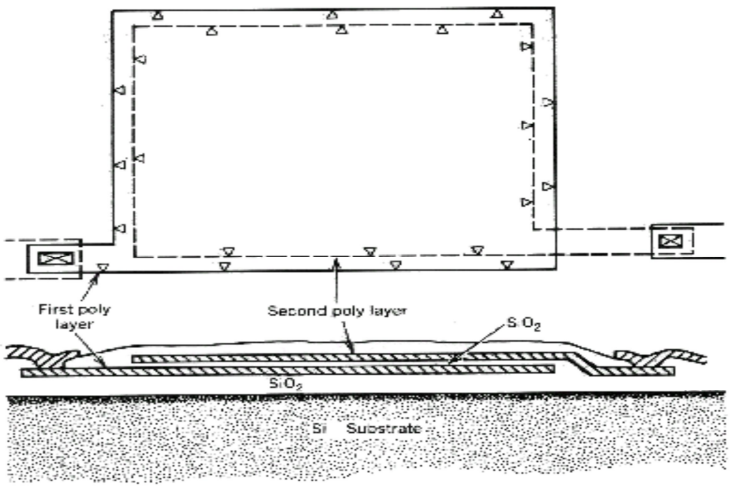
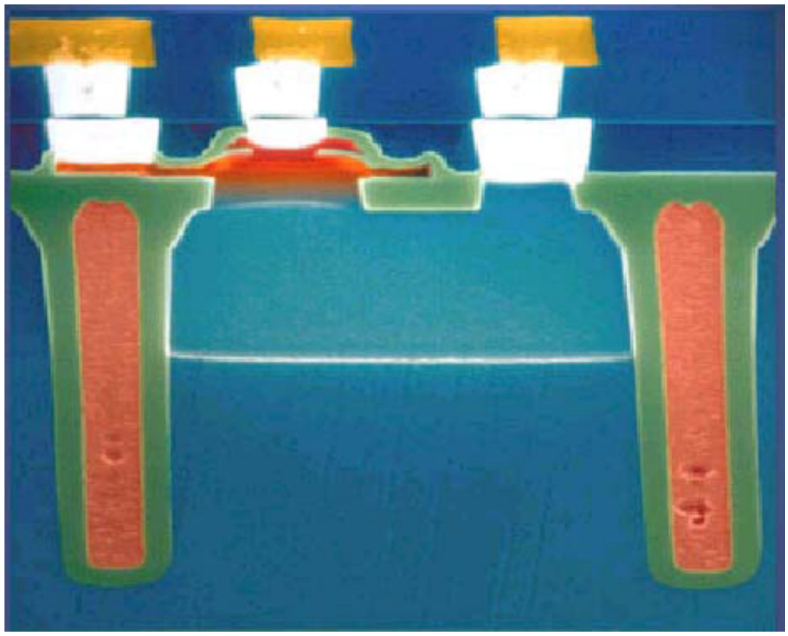


Figure 2.55*b* Plan view and cross section of typical poly–poly capacitor.

الشكل (٧-٦٩)

يمكن تخزين الشحنات المطلوبة فى هذه الخنادق للحفاظ على العناصر التماثلية وعزل الترانزستورات المجاورة في وقت واحد ٠



الشكل (٧-٧٠) المكثفات من طبقات منفصلة من بولي- باستخدام خنادق عميقة