٧ – ٣ – ٥ المكثفات الخطية

بعض أنواع تقنيات ترسيب السيلكون على مادة عازلة مفرغة من الشحنات فى تكنولوجيا الترانزستور[١] المتأثر بالمجال تشتمل على خطوات إضافية لتصنيع المكثفات بمعاملات منخفضة للجهد ودرجة الحرارة٠ يمكن إستخدام آليات ترسيب طبقات الترامزستور لتحديد هذه الطبقات ٠ تتحدد طبيعة تكوين المناطق النشطة من عناصر كابب[٢] وكابن[٣] بخصائص الترانزستور[٤] وبالتالى فإن مقدار الطاقة يتغير بتغير التقنيات المستخدمة٠ أى تغير سيأثر على أداء المكثفات٠ في الإصدارات العملية التي تشمل آلية كابلكن – يتم تشكيل الأقطاب الكهربائية للمكثف الخطي من طبقة من مادة ذات موصلية (ن$^{+}$) (على سبيل المثال آلية زرع كابلكن) وطبقة من بولى سبيكون (ن$^{+}$) – مقاومة المساحة لهذه الطبقة حوالى ١٦٠ أوم/المربع ٠ بعض التطبيقات الخاصة تتطلب الحد من مقاومة الطفيليات الناجمة عن ذلك بزيادة العرض المحيطي للمنطقة النشطة المزروعة بين منبع ومستنزف الترانزستور[٥] ٠ ينبغي فى وجود منطقة محيطة من سيليسيد موصلة أن يكون الحد الأدنى للمنطقة المحيطة المزروعة بين المنبع والمستنزف مالا يقل عن ٠.٥ ميكرومتر٠ في تطبيق نموذجي، يتم إستخدام فلتر تصفية ضيق النطاق للتخفيف من الضوضاء المتولدة عن النطاقات المتعددة لأجهزة الإستقبال وإستخدام مكثف الأغشية الرقيقة عالي الجودة بسبب خصائصة المثالية٠

---

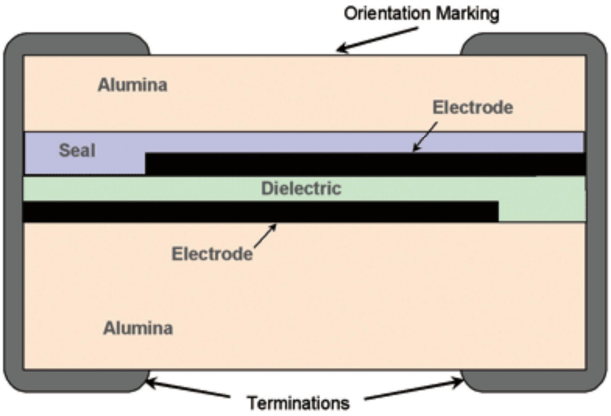
[١] تصميم مكبر للصوت(OTA) operational transconductance amplifier منخفض الجهد والطاقة مستخدما عملية النفاد الكامل (Fully Depleted) سليكون على عازل (FDSOI) ٠ التصميم التناظرى أثبت قوة في العمليات الرقمية القياسية التناظرية لعقود، ولكن مع تطور التكنولوجيا بشكل جزئي لعملية النفاد السيلكون على عازل (PDSOI) ٠

[٢] الإختصار (CAPP) لمكثف بطبقة منشأه من النوع (ب) أسفل اللوحة p–Type Capacitor Bottom Plate Implant Layer

[٣] الإختصار (CAPN) لمكثف بطبقة منشأه من النوع (ن) أسفل اللوحة n-type Capacitor Bottom Plate Implant Layer ،(CAPN) و(CAPP) يمكن استخدامها لتشكيل المقاومات عالية القيمة باستخدام المناطق النشطة

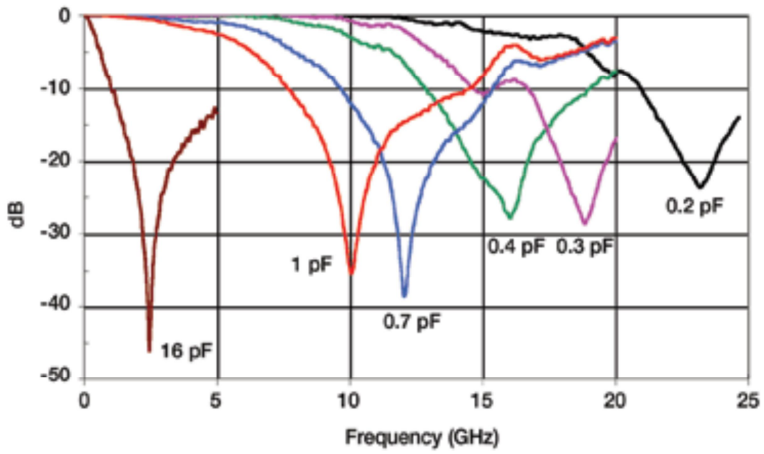
[٤] الإختصار (CAPLCN) طبقة منشأة نوع (ب$^{+}$) p+ implant نتجت عن كثافة الشوائب ٠ وهى مناسبة لتكوين مكثفات بلوحات سفلية بمعامل للبوابة بقناة بين المنبع والمستنزف بمعامل جهد منخفض capacitor bottom plates with PSD–dopant gates والمقاومات عالية القيمة٠

[٥] يتم إنشاء طبقة المنبع والمستنزف من النوع (ن) (NSD) أولا ، بعدها طبقة المنبع والمستنزف من النوع (ب) (PSD)



الشكل (٧-٧١) بناء مكثف غشاء رقيق

تتمتع مكثفات الأفلام الرقيقة (الشكل ٧-٧١) بميزة إضافية فى الأداء. حيث يشتمل منحنى الخصائص على نقطة توليف واحدة ويرجع ذلك إلى إستخدام عناصر ذات طبقة عازلة واحدة كمكثف السيراميك متعدد الطبقات[٦] .

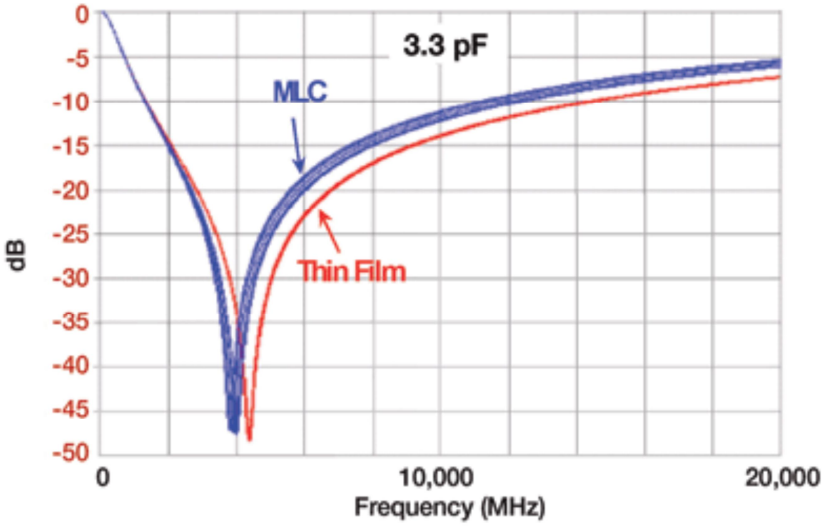


الشكل (٧-٧٢) منحنيات خصائص الفقد لإرسال

يوضح الشكل منحنيات خواص الفقد لعدد قليل من مكثفات الأفلام الرقيقة المستخدمة فى الإرسال. كما يوضح تأثير أداء متسق لمكثف الفيلم الرقيق بأقطاب وسمك طبقة أكسيد على

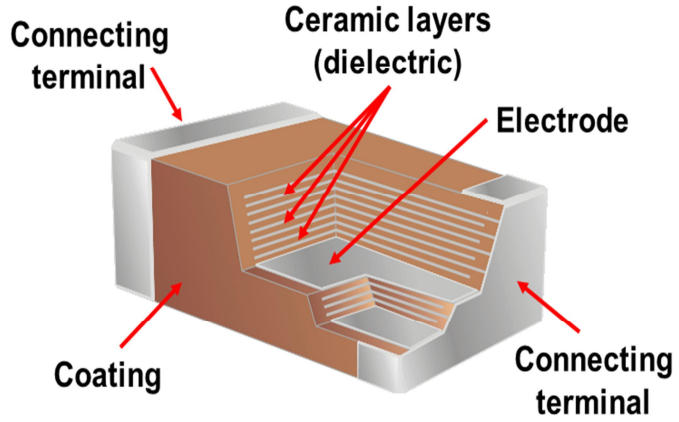
[٦] استجابة نقطة توليف واحدة نتيجة حقيقة أن العناصر تستخدم طبقة عازلة واحدة مثل مكثفات السيراميك متعددة الطبقات(MLCC)

نوعية معامل العازل ٠ من المهم أيضا أن ندرك حدود مكثفات الأفلام الرقيقة المستخدمة كمكثفات ذات نطاق رفض٠



الشكل (٧-٧٣) مكثف فيلم رقيق ذو إستجابة تردد متكررة

حيث تتوفر المكثفات بتكنولوجيا الأفلام الرقيقة بقيم منخفضة السعة ولكنها تقتصر على مرشحات الترددات العالية٠ أما فى حالة الترددات المنخفضة يجب إستخدام أساليب التصفية الأخرى عادة بإستخدام مكثفات ترددات الراديو متعددة الطبقات ذات معامل جودة عالية ٠



الشكل (٧-٧٤) بناء مكثف متعددالطبقات من سيراميك

٧ – ٣ – ٦ تقنية التناثر لمركبات تيتينات الباريم لتطبيقات مكثفات الأفلام الرقيقة

تم تطوير أجهزة جديدة وآليات جديدة لترسيب أفلام رقيقة بتقنية التناثر لمادة تيتانات الباريوم٠ تم ترسيب أفلام رقيقة في درجات حرارة تصل إلى ٩٠٠ درجة مئوية من تارجت من أحد مشتقات الباريوم على أسطح ركائز من السيلكون أو النيكل أو البلاتين وتم دراسة خصائصها بإستخدام الأشعة السينية والمسح الضوئي بالمجهر الإلكتروني والأشعة السينية النانومترية للقياس الطيفي٠ تبين إعتماد تكوين الفيلم والشكل البلورى للمادة المرسبة على درجة حرارة الترسيب والركيزة٠ يتكون الفيلم فى درجات حرارة أعلى من ٦٠٠ درجة مئوية، والطبقات التى ترسبت تألفت من بذور بلورية مع بنية مكعب بيروفسكيتي٠ تكونت طبقة محسنة على سطح ركيزة من البلاتين عند درجة حرارة ٩٠٠ درجة مئوية، وضغط ١٠ ميلى تور ونسبة أكسجين١٠% في محيط من الأرجون٠ يتسبب الأكسوجين الموجود فى حجرة التناثر لأكسدة طبقات النيكل حتى في درجة حرارة ٧٠٠ درجة مئوية٠ تتسبب رفع درجة حرارة عملية الإنتاج حيود أكثر لقمم أكسيد النيكل مع زيادة الكثافة٠ تم تصنيع مكثفات الأغشية الرقيقة بإستخدام ~ ٥٠٠ نانومتر سمك من مركبات المواد العازلة (أكاسيد باريوم – كالسيوم – تيتانيوم – زوركنيوم) (ب ك ت ز)[٧] وأقطاب عليا وجانبية من البلاتين والنيكل٠ تعتبر مركبات باريوم – تيتانيوم بالتكوين البلورى المعروف بإسم بيروفسكيتى من أهم مواد السيراميك الكهربائى فى الصناعة، تتراوح السماحية النسبية لهذه المركبات من عشرون ألف الى ٣٥ ألف٠ وظهرت تطبيقات لمكثفات السيراميك متعددة الطبقات[٢٨] المستخدمة فى صناعة الإلكترونيات٠ يتم تصنيع معظم مكثفات السيراميك متعددة الطبقات بإستخدام تقنيات الفيلم السميك ومع ذلك، تتطلب الإحتياجات المستقبلية لصناعة المكثفات طبقات رقيقة جداً التي يصعب تصنبعها بسهولة مع تقنيات الفيلم السميك٠ وبالإضافة إلى ذلك،

---

[٧] الأفلام المرسبة عند درجات حرارة حتى ٩٠٠ درجة مئوية من تارجت (BCZTO) من مركبات $Zr_{0.18}O_3\ Ti_{0.82}\ Ca_{0.04}\ Ba_{0.96}$

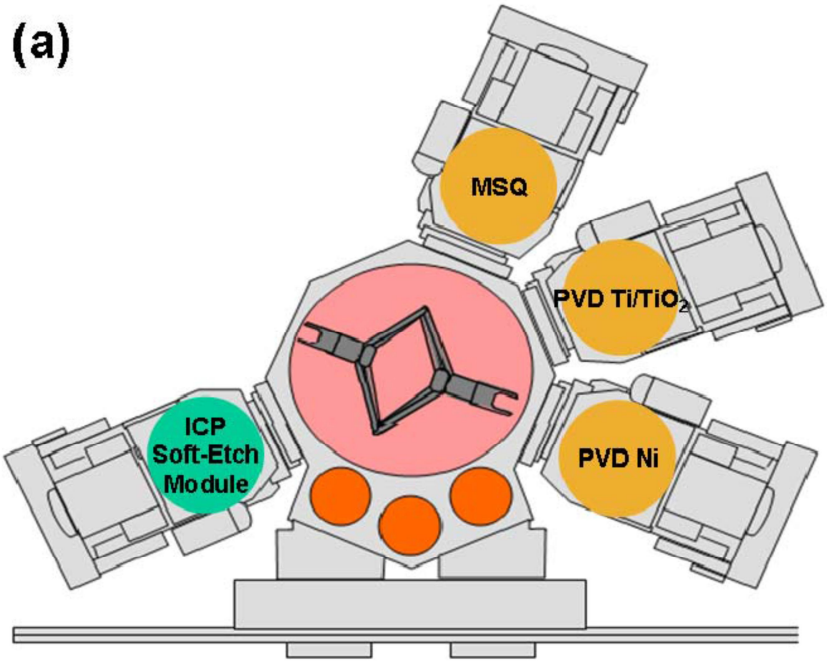
كان هناك إهتمام كبير مؤخرا في تكنولوجيا النظم في شريحة[٨] من أشباه الموصلات التي تتضمن عناصر متكاملة مثل المقاومات والملفات والمكثفات المرسبة إما مباشرة فى الدوائر المتكاملة قبل أو أثناء التعبئة والتغليف ، أو على ركيزة من السليكون أو الزجاج تشتمل على مكونات مختلفة كثيرة٠ تطورت التطبيقات الخاصة لتقنيات الأغشية الرقيقة التي هى بالفعل راسخة في صناعة أشباه الموصلات، على سبيل المثال، ترسيب (سائل – جل)[٩] ، الترسيب بتكنولوجيا التبخير الكيميائي وتكنولوجيا الترسيب الفيزيائى أو المادي، وكل منها قادر على ترسيب طبقات رقيقة بالمقارنة بأساليب الفيلم السميك ٠ كل من هذه التقنيات لترسيب الأغشية الرقيقة لها مزايا وعيوب٠ ويمكن القول أن تكنولوجيا ترسيب (سائل – جل) تعطى خصائص فيلم ممتاز ولكن الآلية بطيئه نسبيا ٠

الترسيب بتكنولوجيا التبخير الكيميائي توفر تقنية ترسيب مثاليه لنسبة العرض إلى الإرتفاع وتحقيق أقصى قدر من المساحة السطحية من الأقطاب إلى المادة العازلة مما يحقق زيادة السعة في وحدة مساحة معينة ولكنها تتطلب خليط عالى التكلفة وغالبا ما يكون كثير السمية أو قابل للإشتعال٠ أما إذا توفر التارجت المناسب فإن تقنية مجنترون التناثر بترددات الراديو تحقق نهج فعال من حيث التكلفة والإنتاجية ونهج نظيف لترسيب مكثفات الأغشية الرقيقة٠ تقنية التناثر من أهداف متعددة في محيط مفرغ واحد لها القدرة على سرعة وكفاءة ترسيب طبقة بالتكوينات البلورية لمادة التارجت مع نطاق واسع من نسب خلط مكونات التارجت ٠ سنتعرض لنظام جديد لتقنية التناثر فى درجات الحرارة العالية قادر على ترسيب مكثفات باريوم تيتينات بتكوين بيروفسكيتى بمعايير إنتاج الأفلام الرقيقة٠

---

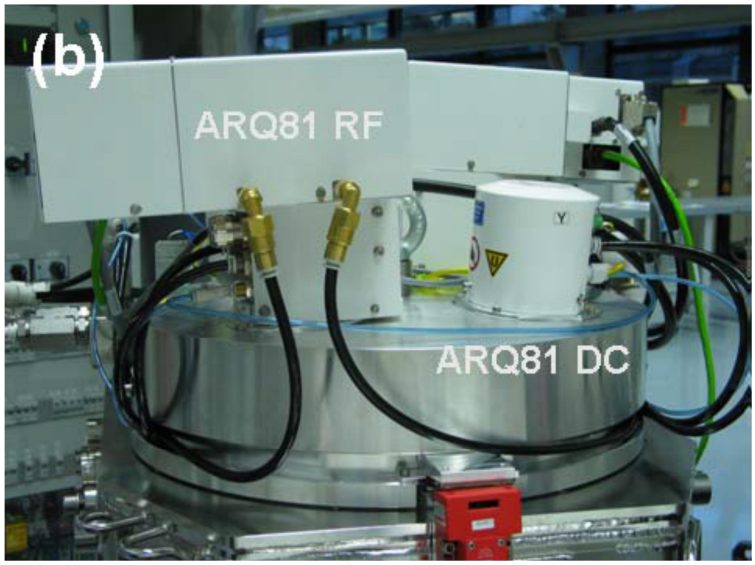
[٨] نظم الحزمة System-in-a-Package (SiP) بمنتجات أشباه الموصلات لإدراج عناصر متكاملة مثل المقاومات والملفات الحث والمكثفات المرسبة إما مباشرة فى دائرة متكاملة قبل أو أثناء التعبئة والتغليف أو على ركيزة من السيلكون أو الزجاج مكون عليها عناصر كثيرة ومختلفة٠

[٩] أسلوب المحلول الجيلاتينى (sol-gel) تقنية لإنتاج مواد صلبة من جزيئات صغيرة٠ المحلول (sol) تتطور تدريجيا نحو تكوين هلام مثل نظام يحتوي على كل من المرحلة السائلة والمرحلة الصلبة حيث حيز التكوين (morphologies) التي تتراوح من جزيئات منفصلة الى جزيئات البوليمر المستمرة



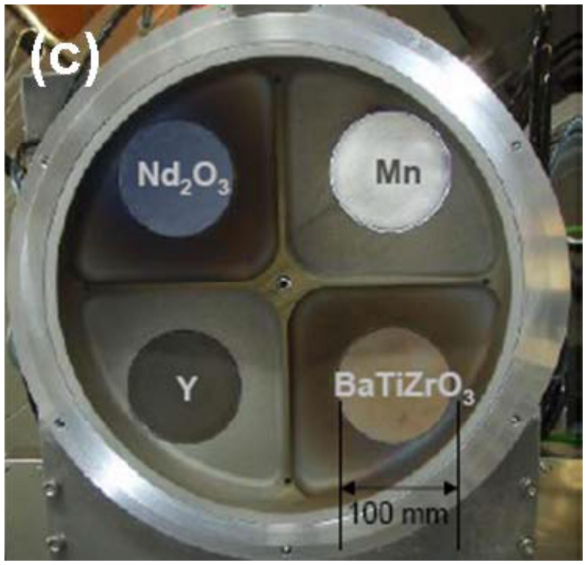
الشكل (٧– ٧٥ أ) التخطيطي نظام ألى بالكامل

تم استخدام نظام ألى بالكامل ويتم التحكم فى وظائفه بإستخدام الكمبيوتر٠ يتألف من وحدة نقل نمطية مركزية محاطة بغرفتين تحميل مفرغين مؤمنين وأربع وحدات إنتاج ووحدات مساعدة إضافية وأيضا نظام للتحكم بالحرارة ووظائف التبريد وذراع روبوتية لنقل الرقائق بين الوحدات النمطية تحت الفراغ (الشكل ٧ – ٧٥ أ) ٠ قبل الترسيب يتم إزالة قدر من سطح الشريحة من أجل إزالة التلوث السطحي ٠ ويتم ذلك في حجرة تفريغ بلازما منخفضة إلى جانب ملفات الحث مع نظام التحيز وتردد ١٣.٥٦ ميغاهرتز متصل على الركيزة٠ مع وحدتين ترسيب بتكنولوجيا التبخير الكيميائي – أحدهما مجهزة بتارجت تيتانيوم ومصدر كهرباء تيار مباشر نبضى٠ والوحدة الأخرى مجهزة بتارجت من النيكل ومصدر كهرباء تيار مباشر قياسى لترسيب طبقات متعاقبة من التيتانيوم / أكسيد التيتانيوم والنيكل على التوالي٠ وقد أستخدمت أقطاب سفلية من النيكل والبلاتين٠ آلية التناثر المستخدمة لترسيب تيتانات باريوم عازلة معدلة تم تصميمها وإعدادها (الشكل ٧ – ٧٥ ب)٠



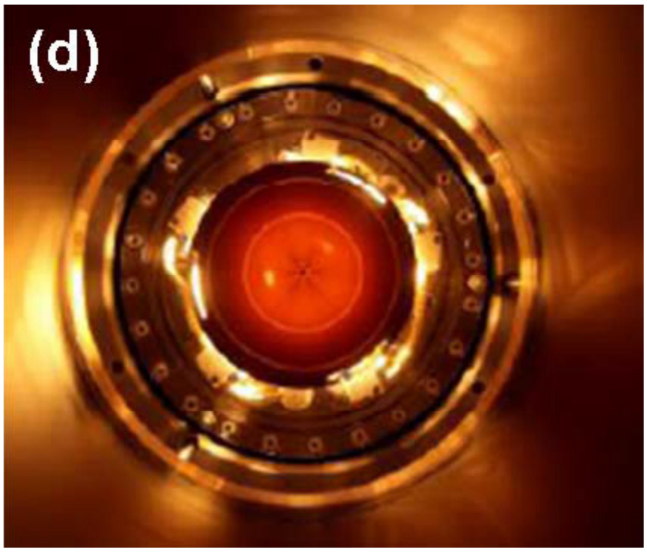
الشكل (٧-٧٥ ب) عرض خارجي لتقنية أورلكون مدعوم بمصدرين للترددات اللاسلكية ومصدرين كهرباء تيار مستمر نبضى

مستخدما أربعة تارجت كل منها بقطر ١٠٠ مم (الشكل ٧-٧٥ ج) .كما تظهر في هذا الشكل درع مصمم خصيصا لعرقلة خط البصر بين كل من الأهداف الأربعة مما يقلل من التلوث المتبادل بينهما٠وحدتين من الأربع مصادر مجهزين بتقنية التناثر بالترددات اللاسلكية حيث أن مادة التارجت تيتينات الباريوم المعدلة وهى من المواد العازلة٠



الشكل (٧- ٧٥ ج) العرض الداخلي لأهداف متعددة ودرع المصدر

الوحدتين الأخريتين تشتمل على مصدر كهرباء تيار مباشر نبضى لتمكينهم الترسيب من أهداف معدنية فى محيط من الأكسجين أو النيتروجين ٠ الركيزة مدعمة بقرص دوار ساخن جدا قادر على تحقيق درجات حرارة تتجاوز ٩٠٠ درجة مئوية (الشكل ١ د) ٠

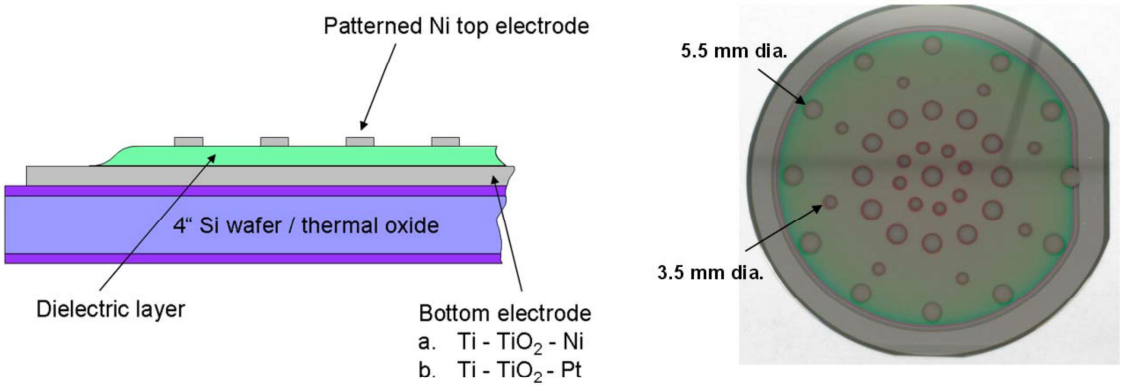


الشكل الشكل (٧-٧٥ د) شكل القرص الدوار من أعلى إلى أسفل ويرى حار جداً في درجة حرارة

تم تصنيع هيكل المكثف كما يلي:

أولا: يتم ترسيب الأقطاب السفلية بآلية التناثر على شريحة سليكون أو أكسيد السيلكون ٤ بوصة٠ القطب السفلي المفضل من النيكل ولكن تم ترسيب قطب إضافى من البلاتين لكونه أفضل خاصة لترسيب طبقة رقيقة من التيتانيوم/أكسيد التيتانيوم تحت طبقة البلاتين٠ طبقة التيتانبوم تساعد على إلتصاق البلاتين والركيزة وأكسيد التيتانيوم لمنع إستقطاب طبقة التيتانيوم لأى ذرات أكسوجين والذى ينتشر خلال ترسيب البلاتين بآلية التناثر وأيضا ليمنع التفاعل بين التيتانيوم والأكسجين والبلاتين٠ أستخدمت طبقة رقيقة من التيتانيوم/أكسيد التيتانيوم تحت طبقة أقطاب النيكل٠ تم ترسيب أفلام رقيقة من مواد عازلة مثل مركب (أكاسيد باريوم – كلسيوم – زركنيوم – تيتانيوم) بعدة شروط٠ وأدخلت رقائق مع القرص الدوار بالفعل في درجة الحرارة العملية ويسمح عادة بالبقاء على القرص الدوار لفترة ١٥ دقيقة للوصول إلى توازن حراري قبل الترسيب٠ سمك الفيلم حوالى ٥٠٠ نانو متر بناء على شروط آلية التناثر المستخدمة وسمك الفيلم المطلوب وزمن العملية يتراوح من ٣ الى ٨

ساعات٠ أستخدم البلاتين والنيكل لترسيب الأقطاب العلوية٠ بعد ترسيب المادة العازلة وتبريد الشريحة يتم ترسيب النيكل عن طريق قناع ظل[١٠]٠ تم تشكيل القناع ليكون على شكل حلقات متحدة المركز لثقبين مختلفى الحجم قطرها ٥و٣ مم و٥و٥ مم٠ تسمح المكثفات الكبيرة بتوفير أفضل للطاقة٠ يوضح الشكل (٧ – ٧٦ أ) تخطيط لهيكل المكثف كما يظهر الشكل (٧ – ٧٦ ب) صورة لرقاقة مجهزة٠الشكل (٧ – ٧٧) ، يظهر صورة مسح ضوئى لسطحين مختلفين لأفلام رقيقة من تيتانات الباريوم تم ترسيبها بآلية التناثر على شريحة رقيقة من السيلكون٠ أحدهما تم ترسيبها عند درجة حرارة ٨٠٠ درجة مئوية (الشكل ٣ أ) والفيلم الثانى في درجة حرارة الغرفة (الشكل ٣ ب) نلاحظ التباين الكبير في البنية السطحية بينما الشكل (٧ – ٧٧أ) يبين بوضوح بلورات، الشكل (– ٧٧٧ ب) الشكل أساسا بدون ملامح٠

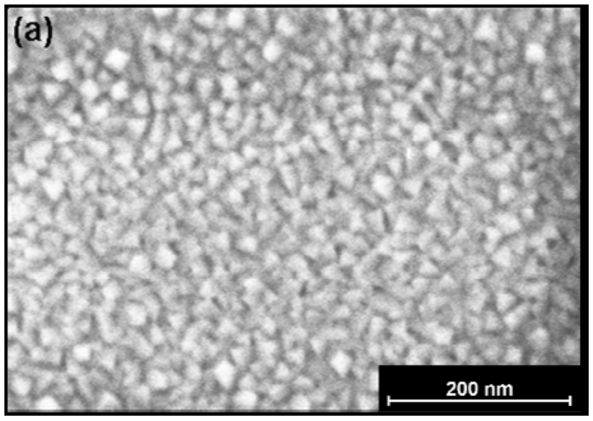


(a) (b)

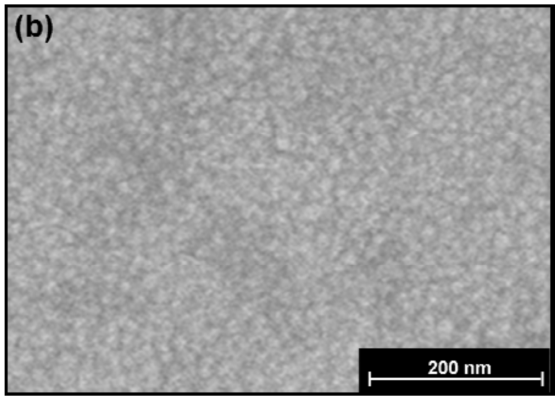
الشكل (٧–٧٦) المقطع العرضي التخطيطي للهيكل مكثف غشاء رقيق الشكل (٢ ب) شريحة مجهزة بعد الترسيب بالتناثر لمادة النيكل للقطب العلوى من خلال قناع الظل

يوضح الشكل (٧–٧٨) – نسب عناصر التكوين البلورى فى الفيلم المرسب المقارب لنفس التكوين البلورى لمادة التارجت (٢و١٩ % باريوم – ٨و٠ % كالسيوم – ٤و١٦ % تيتانيوم – ٦و٣ % زوركيوم و ٦٠% أكسجين) ٠

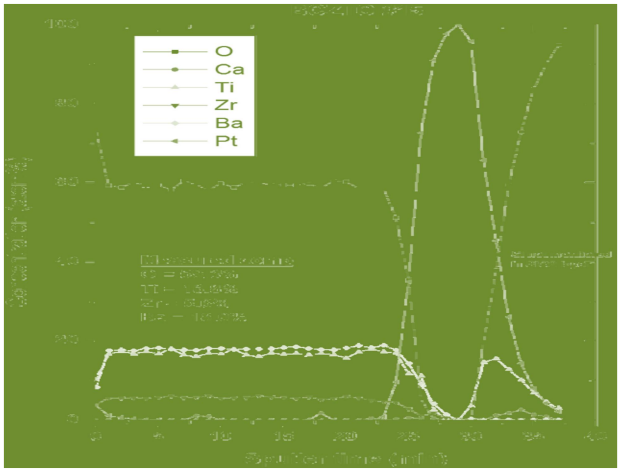
[١٠] قناع الظل هو أحد التكنولوجيات المستخدمة في تصنيع أنبوب أشعة الكاثود cathode ray tube (CRT) لأجهزة التلفزيون وشاشات الكمبيوتر التي تنتج الصور الملونة



الشكل (٧-٧٧ أ) صورة مسح ضوئئ لسطح فيلم تم ترسيبه من مركب (أكاسيد الباريوم – الكالسيوم – زنك – تيتانيوم) عند درجة حرارة ٨٠٠ درجة مئوية٠ تظهر البلورات واضحة



الشكل (٧-٧٧ ب) صورة مسح ضوئئ لسطح فيلم تم ترسيبه من مركب (الباريوم – الكالسيوم – زنك – تيتانيوم) عند درجة حرارة الغرفة العادية



الشكل (٧-٧٨) نسب تكوين مواد الفيلم المرسب سمك ٥٠٠ نانو متر من (أكاسيد الباريوم – الكالسيوم – زنك – تيتانيوم) مع أقطاب من البلاتين ومساحته ٦٠٠ ميكرومتر مربع

- **الخواص الكهربائية لمكثفات الأفلام الرقيقة**

بقياس السعة والمقاومة المتوازية لمكثفات الفيلم الرقيق من مادة عازلة سمكها ~ ٥٠٠ نانومتر عند إشارة صغيرة (٥٠ ميلى فولت، 20 هرتز)٠ من هذه النتائج يمكن حساب معامل العزل والمقاومة النوعية لأفلام تيتانات باريوم المعدلة٠ كما أظهرت جميع المكثفات تيارات تسرب عالية بسبب شروط الترسيب٠ لوحظ العديد من المقاومات النوعية بقيم نموذجية لمواد أشباه الموصلات كما يمكن تصنيف أفضل الأفلام باعتبارها "عوازل مسربة[١١] تم قياس الثوابت الزمنية (مقاومة x مكثف) للمكثفات عند إشارة صغيرة وكانت في نطاق ٣و٠ الى ٥و٠ ثانية٠ وكان هناك فرق كبير في السعة بين المكثفات ذات الأقطاب السفلية من النيكل والبلاتين فى حالة إضافة أكسوجين بغرفة التناثر٠ وهذا يعزى إلى أكسدة النيكل عند تعرضها للأكسجين في درجات حرارة عالية٠ أكسيد النيكل شبه العازل الذى يتكون على الواجهة بين قطب النيكل السفلى ومكونات الفيلم العازلة (أكاسيد الباريوم – الكالسيوم – زنك – تيتانيوم) ويعتقد أنها تتصرف كمكثف على التوالى– مما يؤدى هذا الى الحد من فاعلية السعة الكلية للمكثف٠

$$C_{eff} = \frac{C_{\mathrm{BCZTO}}\, C_{IF}}{(C_{\mathrm{BCZTO}} + C_{IF})}$$ **المعادلة (٧–١٩)**

حيث (C_{eff}) هى السعة الفعلية و(C_{BCZTO}) السعة الناتجة من المادة العازلة و(C_{IF}) السعة الإضافية نتيجة أكسدة سطح فيلم النيكل٠ تسلك الفراغات المملوءه بالأوكسجين خواص كأنها إلكترون مانح فى تيتانات باريوم مما يؤدي إلى زيادة الموصلية الكهربائية٠ زيادة طفيفة في الأكسوجين بنسبة حتى ١٥% تتسبب فى زيادة المقاومة النوعية للفيلم المرسب (ب – ك – ز – ت) عند ٧٠٠ درجة مئوية ولكن في ٩٠٠ درجة مئوية، كانت النتائج مماثلة للأفلام المرسبة فى محيط التناثر بنسبة أوكسجين ١٠% ٠ خلط أوكسجين

---

[١١] الثقوب هى السر للعزل الخالي من التسرب (leak–free insulation) مثلا نموذج ومادة قرص العسل عالية العزل (highly insulating honeycomb material) يمكن أن تسمح للدوائر المتكاملة فى الإلكترونيات الدقيقة لتكون صغيرة الأبعاد فى التصنيع ترفع قدرات تكنولوجيا الرقائق الدقيقة والكمبيوتر.

مع غاز التناثر فى وجود ضغط مرتفع ينتج عنه معدلات الترسيب أقل٠ أثبتت آلية التناثر بترددات الراديو فى غرفة تناثر محكمة أنها أنسب طريقة لترسيب أفلام رقيقة من مواد عازلة٠ النظام المستخدم يمكنه إضافة شوائب لمادة مثل تيتنات الباريوم مما يسمح للتحقق من قيم الشوائب على السماحية النسبية للعازل والخصائص الكهربائية الأخرى٠ حالما يتم التعرف على تكوين الفيلم الأمثل، فالأفضل التبديل إلى نظام تقليدى للتناثر مع تارجت واحد مستوى ونظرا لإرتفاع معدلات الترسيب وتوجيهها نحو أفضل إستخدام للتارجت تبعا الى التجهيزات القياسية٠ أظهرت الأفلام المرسبة من (أكاسيد ب ك ز ت) تسرب كهربائياً٠ ربما بسبب العديد من فراغات الأكسجين الناشئة أثناء نمو الفيلم٠ ومن المعروف أن كل إضافة لشوائب والتأكسد أو الحد من درجة حرارة المرتفعة للتسخين تؤثر على موصلية المواد العازلة للكهرباء القائمة على تيتانات باريوم٠ مركبات تيتانات باريوم ومشتقاتها مع هيكل بيروفسكيتي تعتبر أهم مواد السيراميك الكهربائى العازلة في الصناعة٠ هذه المواد تستخدم على نطاق واسع كمكثفات عازلة بسبب إرتفاع ثابت العزل كما تستخدم أيضا فى تصنيع العناصر التى تتأثر بالضغط (بيزو كهربائية)[١٢] وعناصر الإنذار بالحريق (بيروكهربائية)[١٣] كما تستخدم فى البصريات الكهربائية٠ المواد المماثلة تشكل أساسا وحدات تخزين الطاقة الكهربائية[١٤] والتى تستخدم فى تطبيقات المركبات الكهربائية مع كثافة الطاقة أكبر من

---

[١٢] بيزوكهربية (Piezoelectricity) هى الشحنة الكهربائية المتراكمة في المواد الصلبة استجابة لتطبيق الضغط الميكانيكي. مصطلح بيزوكهربية تعنى توصيل كهربائى نتيجة ضغط ٠ عناصر الإستشعار البيزوكهربية تستخدم تأثير بيزوكهربية (piezoelectric effect,) لقياس التغيرات فى الضغوط ، التسارع (acceleration) درجات الحرارة والإجهادات أو القوى بتحويلها الى شحنات كهربائية٠ بيزو (*piezo*) كلمة يونانية بمعنى ضغط أو العسر (squeeze)٠

[١٣] بيروكهربية (Pyroelectricity) قابلية مواد معينة لتوليد جهد مؤقت عند تسخينها أو تبريدها ٠ التغير فى درجات الحرارة يعدل أماكن الذرات قليلاً داخل البنية البلورية، مما يغير الإستقطاب فى المواد. يغير هذا الإستقطاب ويسبب إرتفاع الجهد خلال البلورة. بيرو (Pyro) كلمة يونانية بمعنى نار أو حريق٠

[١٤] عناصر تخزين الطاقة أو الوسط الفيزيائى لتخزين الطاقة للقيام بعمليات مفيدة في وقت لاحق. يسمى عنصر تخزين الطاقة أحيانا مركم (accumulator)٠ أشكال عديدة من الطاقة تحقق وظائف مفيدة مثل التدفئة أو التبريد لتلبية الاحتياجات المجتمعية. أشكال هذه الطاقة تشمل الطاقة الكيميائية وطاقة الجاذبية (gravitational potential energy) والقدرة الكهربائية، مجلات كهربائية والتغير فى درجات الحرارة والحرارة الكامنة (latent heat) والطاقة الحركية

٣٠٠ وات – ساعة/كجم ٠ أعلى بكثير من بطاريات الليثيوم–أيون والمكونات الكهربائية المستخدمة عادة في السيارات الكهربائية الهجينة٠ تعتمد القدرة على تخزين الكميات الكبيرة من الطاقة في مكثفات السيراميك الكبيرة المتعددة الطبقات[٢٨]على المادة العازلة للحفاظ على معامل العزل عالي جداً في المجالات الكهربائية العالية٠ يمكن إستخدام الأحجام الصغيرة من وحدات تخزين الطاقة الكهربائية كمكثفات تخزين الطاقة و"البطاريات الإلكترونية" وفي تطبيقات نظم الحزمة٠ أستخدمت مركبات تيتانات الباريوم المطعمة والمرسبة بإستخدام تقنيات الأفلام الرقيقة للمكثفات للترددات العالية والمكونات الإلكترونية السلبية وبطاريات تخزين الطاقة القابلة لإعادة الشحن مثل بطاريات الفيلم الرقيق من الليثيوم وفي المستقبل غير البعيد جداً مكثفات الأفلام الرقيقة السوبر في حزم الدوائر المتكاملة متعددة الوظائف٠ هذه النظم يمكن أن تكون مفيدة للغاية في حالة تشكيل شبكة من أجهزة الإستشعار المتمتعة ذاتيا لوضع معلومات عديدة حول العالم ، تمكننا من الكشف مثلا عن حرائق الغابات ومكافحتها٠ التلوث والمرض وحتى تساعد فى التنبؤ بالزلازل٠ وحدة تخزين الطاقة لها كثافة طاقة أعلى بكثير من بطارية ليثيوم الأفلام الرقيقة، كثافة الطاقة ودورة الحياة لمكثف الإلكتروستاتيكي غير مكلفة – المواد غير الخطرة مثل تيتانات باريوم المطعم والنيكل سيكون له أثر كبير لتطبيقات أجهزة الإستشعار ذاتية الطاقة التي يمكن أن تعمل إلى أجل غير مسمى بإستخدام حصاد الطاقة من البيئة المحيطة بالطاقة الشمسية المتكاملة وعناصر البيزو كهربائية أو الأجهزة الحرارية٠ بإستخدام تقنيات التناثر بالتبخير لترسيب هذه المواد مع حزم أشباه الموصلات يمكن أن يكون من الأفضل تصنيعها في إحدى الشركات المصنعة للعناصر المتكاملة٠ وفي المقابل فإنة من الأفضل تصنيع بطاريات ليثيوم الفيلم الرقيق و/أو المكثفات سوبر الكهروكيميائية فى مكان آخر حيث يمكن أن تسبب الفلزات القلوية أداء خطير وتسفر عن مشاكل منها تلوث عملية إنتاج الترانزستور (معدن–أكسيد–سيلكون) أو على مرافق إنتاج الدوائر المتكاملة الأخرى٠ على الرغم من أنه بذل الكثير من الإهتمام

(kinetic energy)٠ يشتمل تخزين الطاقة تحويل الطاقة من شكل يصعب تخزينة مثل الكهرباء والقدرات الكهربائية الى أشكال أكثر سهولة أو قابلة للتخزين إقتصاديا٠

لسلوك تيتانات باريوم والمواد العازلة ذات الصلة عند ترددات أعلى من ١٠^{٣} هرتز٠ إذا أريد لهذه المواد أن تعمل بشكل فعال في البطاريات الإلكترونية فمن المهم تمييز سلوكها مع الترددات المنخفضة وأداءها مع التيار المباشر على الشكل التالى:

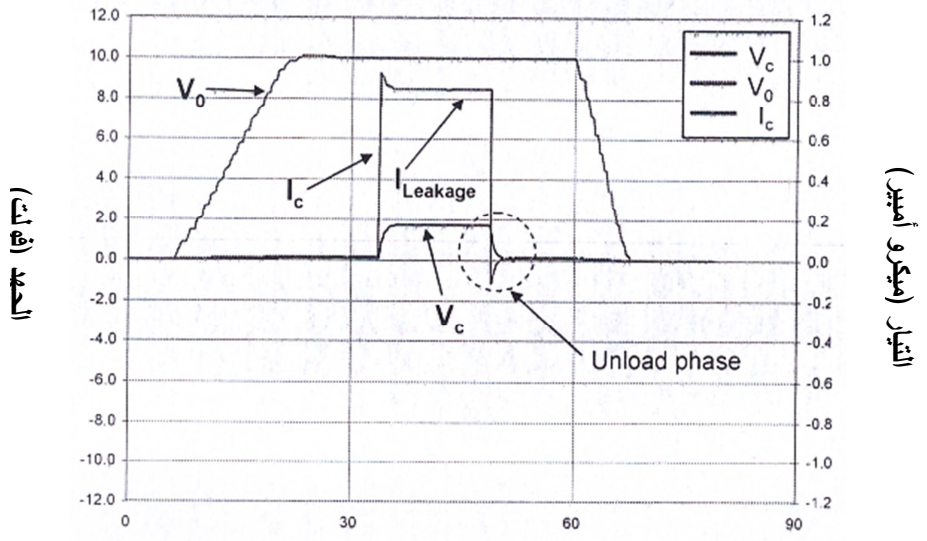
١. ضرورة التعرف على السعة الإضافية وبيانات المقاومة المتوازية التى تم قياسها عند تحيز مختلف لمجالات التيار المباشر٠

٢. تحديد قيم انهيار العزل الكهربائي للمواد

٣. تحديد قيم ثابت العازل كدالة للترددات المستخدمة حتى ١ ميجا هرتز

٤. تحديد قيم الإستقطاب مقابل المجال الكهربائي المكتسب بإستخدام دوائر البرج[١٥]

٥. تحديد بيانات تحميل/إلغاء تحميل التيار المباشر بإستخدام دائرة كهربائية بسيطة؛



الشكل (٧-٧٩) اختبار الشحن/تفريغ للتيار المستمر مع مكثف = ٣٣٠ نانو فاراد ومقاومة تسريب ٢ ميجا أوم (مكثف تجاري)

---

[١٥] دائرة سوير-برج (Sawyer-Tower) بسيطة تسمح بقياس جميع الجوانب لخصائص المكثف الفيروكهربية. بإستخدام دائرة سوير-برج ومكثف (AD capacitor) يمكن قياس خواص التباطؤ الاستقطاب (Polarization Hysteresis) والتبديل وعدم تبديل نصف الحلقات (Switching and Non-switching Half-Loops) والإجهادات (Fatigue) والإحتفاظ بحقوق (Retention) البصمة (Imprint)

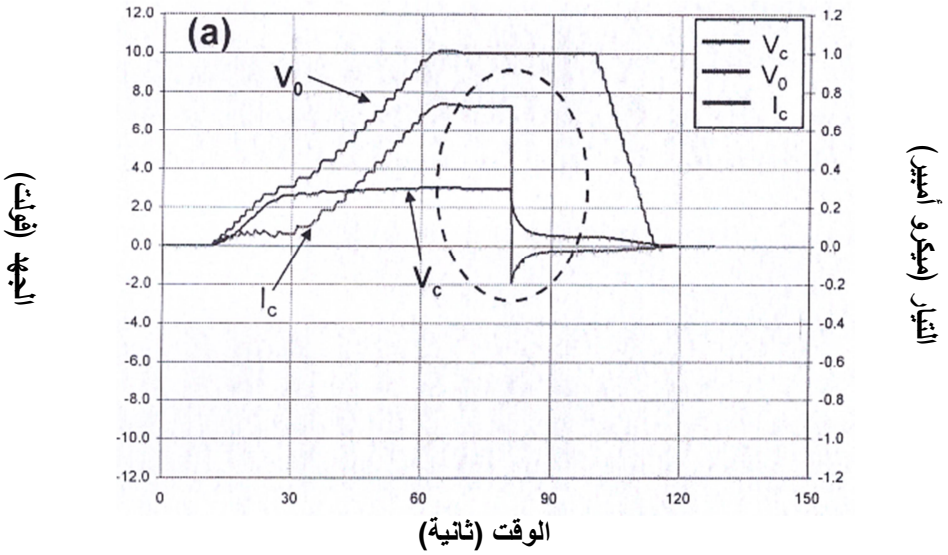
لإستخدام المكثف كبطارية إلكترونية، يجب تخزين وتفريغ الطاقة تحت ظروف التيار المباشر٠

عن طريق دائرة تسمح أن يتم شحن المكثف من خلال مقاومة قياسية قيمتها ١٠ ميجا أوم مع جهد معين من مصدر تيار مباشر٠ بملاحظة التيار في الدائرة والجهد الواقع على لوحى المكثف ، يمكن قياس الطاقة المخزنة فى مكثف الفيلم الرقيق كالتالى:

أولاً، محاكاة الدائرة المكافئة لمكثفات الأفلام الرقيقة بمقاومة قياسية قيمتها ٢ ميجا أوم ومكثف ٣٣٠ نانو فاراد على التوازى ٠

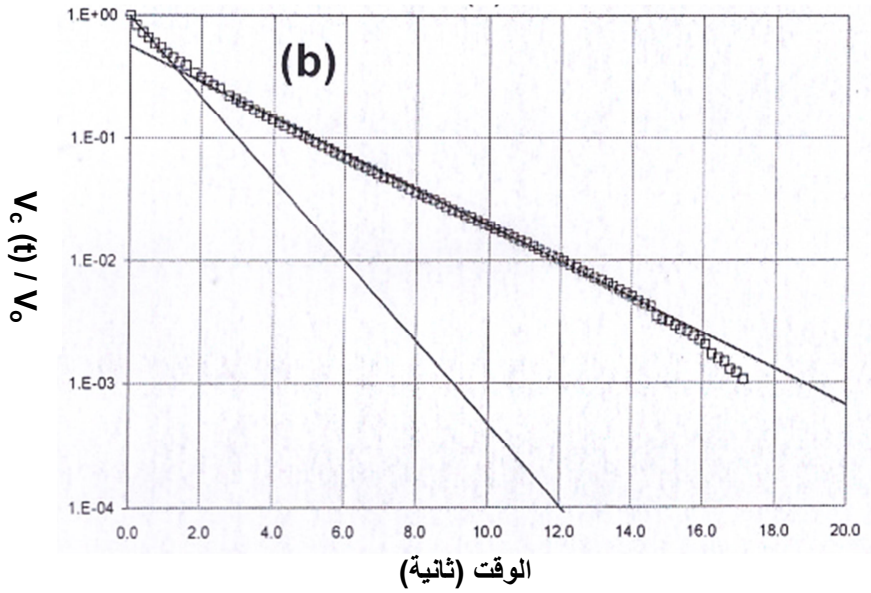
ثانيا : فصل المصدر الكهربائى ومفتاح التبديل عن المكثف ويسمح للمكثف بالتفريغ من خلال المقاومة القياسية٠ يوضح الشكل (٧ – ٧٩) هذه الظاهرة كإنعكاس فورى للتيار (I_c) متبوع بإضمحلال بطيء للتيار (I_c) والجهد (V_c) حتى قيمة الصفر٠ من خلال دمج حاصل ضرب الجهد (V_c) والتيار (I_c) مع الزمن

المعادلة (٧–٢٠) $\int V_c\,(t) x\, I_c\,(t)\; dt$



يوضح الشكل(٧ – ٨٠أ) بيانات مشابهه لمكثف مصنع بقطب سفلى من البلاتين ، وقطب علوى من النيكل ومادة عازلة تيتانات باريوم المرسبة عند درجة حرارة ٩٠٠ درجة مئوية وخليط من غاز التناثر ١٠% أوكسجين و٩٠% أرجون٠ من الجدير بالذكر أن الجهد

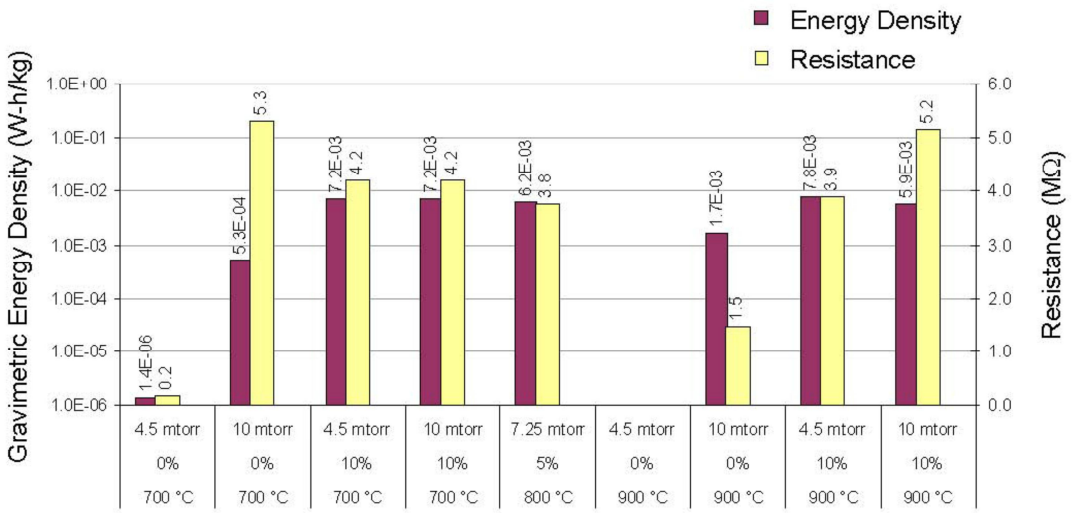
على المكثف لم يتناقص بشكل مضاعف إلى الصفر كما كان متوقع ولكن بدلاً من ذلك يبدو أن هناك آليتان للتفريغ منفصلين مشاركين مع معدلات ترسيب مختلفة (الشكل ٧ – ٨٠ ب) ربما كان هذا بسبب إسترخاء المجال٠



الشكل (٧–٨٠) بيانات الشحن/تفريغ للتيار المستمر (ب) السلوك إضمحلال الجهد للمكثف بقطب سفلى بلاتين ومادة عازلة مرسبة (أكاسيد ب ك ز ت) عند درجة حرارة ٩٠٠ مئوية وضغط ١٠ ميلى تور وخليط من غاز التناثر ١٠% أوكسجين و٩٠% أرجون وقطب علوى من النيكل

فى جميع الحالات فإن الطاقة المخزونة فى مكثف الفيلم الرقيق قليلة– الطاقة القصوى المحددة ٨ x ١٠$^{-٣}$ وات–كجم/ساعة إعتمادا على كتلة العازل المقدرة فقط ، ومن الجدير الملاحظة أيضا أن أفضل مكثفات (أكاسيد ب ك ز ت) لها تسريب كهربائى مما يجعلها ليست ذات فائدة عملية حقيقية فى تطبيقات البطاريات الإلكترونية٠ عند جهد ١٠ فولت يتراوح التيار المتسرب من ٢ الى ٥٠ ميكرو أمبير المقابل لكثافة تيار متسرب من ٨ الى ٢٠٠ ميكرو أمبير/سم^{٢} وأكبر مقاومة داخلية كانت حوالى ٥ ميجا أوم ٠الطاقات المحددة إعتمادا على كتلة العازل المقدرة فقط والمقاومة الداخلية للمكثفات الفيلم الرقيق المرسب من مركبات تيتانات الباريوم المطعمة مع إختلاف شروط التناثر موضحة فى الشكل (٧ – ٨١)٠ مكثفات الأفلام الرقيقة من مواد ثانى أكسيد السيلكون أو أكسيدات الألومنيوم لها قيم إنهيار عالية جداً تصل الى أكبر من ٥ ميجا فولت/سم يؤدي هذا إلى تحديد الحد

الأعلى لكثافة الطاقة من ١و٣ و ٧و٦ جول/سم^{٣} لمعامل عزل من ٩و٣ الى ٤و٨ على التوالى ، عند مجال كهربائى شدته ٣ ميجا فولت/سم٠ أكاسيد التيتانيوم بمعامل عزل يساوى ٢٦ لها كثافة طاقة ٢١ جول/سم^{٣} لنفس شدة المجال الكهربائى٠ كثافة الطاقة هذه مقابلة الى ٨٦و٠ و ٨٦و١ و٨٣و٥ وات- كجم/ساعة على التوالى٠



الشكل (٧-٨١) الطاقات المحددة والمقاومة الداخلية للمكثفات الفيلم الرقيق المرسب من مركبات تيتانات الباريوم المطعمة مقابل شروط ترسيب المواد العازلة

مكثفات تيتانات باريوم المطعمة بمعامل عزل حتى ٣٣٥٠٠ وأيضا إلى حد كبير أقل من كثافة الطاقة لبطارية ليثيوم أيون القابلة لإعادة الشحن وبطاريات فيلم الليثيوم الرقيق٠ ولذلك فمن المفيد كيفية إضافة طاقة يمكن تخزينها في مواد ذات قطبية مثل تيتانات الباريوم ومشتقاتها بالتكوين البلورى بيروفسكيتى٠ المجال المستخدم على الرغم من شدة الإنهيار كانت ٢٠٠ كيلو فولت/سم ، الأفلام التى وقعت تحت هذا الضغط عند المجالات المرتفعة أظهرت أنها تتحلل بتكرار التطبيق ٠ للمكثفات المستوية حيث سلوك المواد العازلة يظل خطى حتى جهد الإنهيار، تحسب الطاقة المخزونة لكل وحدة حجم من المادة العازلة بوحدات الجول/م^{٣}

$$ED = \frac{1}{2} \in_o \in_r V^2$$ المعادلة (٧-٢١)

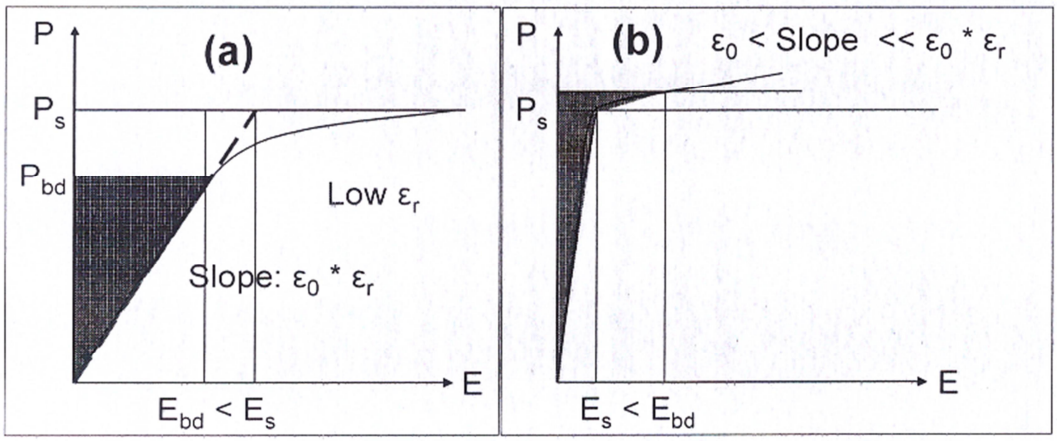
حيث (ED) كثافة الطاقة الحجمي و($\in_r$) معامل العزل للمادة و($\in_o$) معامل العزل فى الفراغ ويساوى ٨٥٤و٨ × ١٠$^{-١٢}$ فاراد/متر و(V) الفرق فى الجهد على سطحى المكثف بالفولت٠ إذا إستمر معامل العزل ($\in_r$) بشكل خطى حتى جهد إنهيار المادة ، كثافة الطاقة القصوى التى يمكن تخزينها فى مثل هذا النوع من المكثفات محدودة قوة العزل الكهربائي على النحو التالى:

$$ED_{max} = \frac{1}{2} \in_o \in_r V_{bd}^2$$ المعادلة (٢٢-٧)

حيث (ED_{max}) كثافة الطاقة الحجمى القصوى و(V_{bd}) جهد الإنهيار للمادة الخطية٠ كثافة الطاقة لمثل هذا المكثف تتناسب طرديا مع معامل العزل ($\in_r$) عند جهد إنهيار محدد٠ معظم المواد العازلة لها سماحية نسبية بين ١ و ١٠٠ ٠ للمواد العازلة الإفتراضية بسماحية نسبية ١٠٠ وسلوكها خطى حتى شدة مجال كهربائى ٣ ميجا فولت/سم ، فإن كثافة الطاقة المقابلة حوالى ١٤و٢٢ وات- كجم/ ساعة ٠ بإستخدام العلاقة الرياضية المعروفة للشغل الناتج من حركة الجسيمات المشحونة فى المجال الكهربائى:

$$W = q.\ E\ .\delta$$ المعادلة (٢٣-٧)

حيث (δ) مسافة الحركة ويمكن حسابها لشدة مجال ٣ ميجا فولت/سم ٠ فإن أقصى شغل مرتبط بالإستقطاب لمكعب تيتانات باريوم يساوى ٩و٢ كيلو جول/مول كقاعدة عامة ،



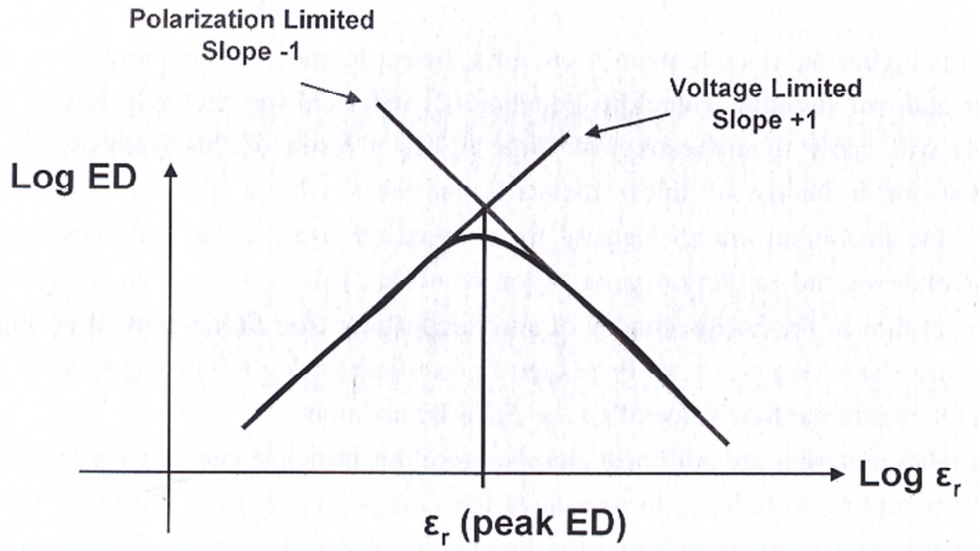
الشكل (٧-٨٢) تمثيل بيانى للإستقطاب مقابل شدة المجال الكهربائى حيث الطاقة المخزونة محددة بنقطة إنهيار المادة العازلة ($E_{bd} < E_s$) - (ب) كما فى الشكل (أ) ولكن الطاقة المخزونة محددة بنقطة تشبع الإستقطاب ($E_s < E_{bd}$) ٠

المكثفات المصنعة بمواد عازلة لها سماحية نسبية عالية ليس لها كثافة طاقة عالية ويمكن الوصول الى ذلك عن طريق مطابقة ($\in_r$) و(V_{bd}) على نحو مناسب٠ فى حالة مكثف مستوى بعازل إفتراضي له سلوك خطى حتى مجال الإنهيار – يوضح الشكل (٧ – ٨٢أ) تمثيل بيانى للإستقطاب مقابل شدة المجال الكهربائى لمثل هذا المكثف٠يمكن حساب كثافة الطاقة القصوى للمكثف ٠ فى حالة العازل الإفتراضى حيث السماحية النسبية كبيرة وتتغير تقريبا بشكل خطى مع شدة المجال الكهربائى المستخدم حتى نقطة تشبع الإستقطاب ثم تتناقص إلى حد كبير حتى تصل الى قيمة جهد الإنهيار (V_{bd}) والموضح بالشكل (٧ – ٨٢ ب) ٠ فى هذه الحالة كثافة الطاقة القصوى للمكثف سوف تكون مقيدة بنقطة تشبع الإستقطاب للمادة العازلة وهكذا فهى ملائمة للتعبير عن كثافة الطاقة لمثل هذا المكثف من حيث الاستقطاب:

المعادلة (٧–٢٤)
$$ED_{max} = \frac{1}{2} P_s^2 (\varepsilon_o \varepsilon_r)^{-1}$$

حيث (P_s) تشبع الإستقطاب٠ بالنظر فى المعادلة (٧ –٢٢) والمعادلة (٧ –٢٤) حيث كثافة الطاقة القصوى محدودة بجهد الإنهيار للمادة العازلة وتتناسب مع معامل العزل ($\in_r$) ومع ذلك حيث كثافة الطاقة القصوى محدودة بنقطة تشبع الإستقطاب للمادة العازلة (المعادلة ٧ ـ ٢٤) ، التى تتناسب عكسيا مع معامل العزل ($\in_r$)٠ فى هذه الحالة ينتج إرتفاع فى معامل العزل للمادة عند كثافة طاقة قصوى أقل٠ عادة ، معامل العزل المرتفع للمواد العازلة يميل للوصول لحالة التشبع عند قيم أقل من جهد الإنهيار٠ وبالتالى المعادلة (٧ –٢٢) تستخدم لمعامل العزل المنخفض للمواد بينما (٧–٢٤) تستخدم للمواد ذات معامل عزل مرتفع٠ ولذلك يمكننا أن نستنتج أن مجموعة من المواد العازلة للكهرباء ذات السلوك الخطى مع جهد الإنهيار والإستقطاب ، كثافة الطاقة القصوى للمكثف بإستخدام هذه المواد ينتج عنه إنهيار المادة العازلة وتشبع الإستقطاب بالتزامن٠ وهذا يظهر تخطيطياً فى الشكل (٧ – ٨٣) حيث اللوغاريتم لكثافة الطاقة لمثل هذا المكثف (*log ED*) مقابل لوغاريتم معامل العزل عند معامل عزل المادة ($\in_r$) منخفض٠ من الشكل (٧ – ٨٣) يتبين

أن ميل اللوغاريتم لكثافة الطاقة مقابل لوغاريتم معامل العزل ($\in_r$) يساوى ١ ٠ عند نقطة التقاطع فى منتصف قيمة معامل العزل نجد لوغاريتم كثافة الطاقة هو الأكبر٠



الشكل (٧-٨٣) رسم لوغاريتم كثافة الطاقة مقابل لوغاريتم معامل العزل النسبى لمجموعة مواد مع جهد الإستقطاب والإنهيار

References

1. **Bhalla, A.S.; Guo, R.; Roy, R. The perovskite structure—A review of its role in ceramic science and technology. Mat. Res. Innovat. 2000, 4, 3–26.**
2. **Hansen, P. Multilayer capacitor comprising barium-titanate doped with silver and rare earth metal. U.S. Patent 6,078,494, 20 June 2000.**
3. **Kishi, H.; Mizuno, Y.; Chazono, H. Base-metal electrode-multilayer ceramic capacitors: past, present and future perspectives. Jpn.J.Appl.Phys.2003, 42, 1–15.**
4. **Weir R.D.; Nelson, C.W. Electrical-energy-storage unit (EESU) utilizing ceramic and integrated-circuit technologies for replacement of electrochemical batteries. U.S. Patent 7,033,406, 25 April 2006.**
5. **Torres, E.O.; Rincón-Mora, G.A. Energy-harvesting system-in-package (SiP) microsystem. *ASCE J. Energy Eng.* 2008, *134*, 121–129.**