

نمذجة تيار الفقد في مكثفة ترانزستور MOS

معدن / أكسيد / شبه ناقل

بوروبة فريد¹ ونوغي زهير² بوصبيعات السعيد³

1مخبر بصريات الالكترونيات والمركبات(LOC)، جامعة فرحات عباس سطيف، الجزائر

E-mail: farid.bourouba@g.ens-kouba.dz هاتف: +213(0)663141368

2 مخبر بصريات الالكترونيات والمركبات(LOC)، جامعة فرحات عباس سطيف، الجزائر

E-mail: ouzahir@univ-setif.dz هاتف: +213(0)776317925

3 مخبر الأنظمة المندمجة للواقط (LSIC)، المدرسة العليا للأساتذة القبة القديمة الجزائر العاصمة

E-mail: Essaid.bousbiat@g.ens-kouba.dz هاتف: +213(0)541972369

Doi 10.5281/zenodo.7991215

تاريخ القبول: 18 جانفي 2023

تاريخ الوصول: 30 أكتوبر 2022

الملخص (Abstract):

في ظلّ تطوير ترانزستورات موصفت (MOSFET) إلى السّلم النّانوي (تصغير أبعاد الموصفت إلى النّانومتر) أخذ العلماء بعين الاعتبار عاملين أساسيين هما كَيْفِيَّة نقل المعلومة بسرعة ودقة فائقتين مع التّصغير في الأبعاد تزامنا مع هذا التّسابق في التّصنيع ظهر ما يسمى بتيار الفقد (تيار ضائع) على مستوى المكثّفة موص MOS عبر العازل والذي قد يسبّب إتلاف المركب إذا كانت شدته عالية وبالتالي فساد المعالج الدقيق (Microprocesseur) مما جعلنا نهتم بنمذجة هذا التيار من خلال التّعرف على بنية المكثّفة (MOS) وأنظمة تشغيلها وتوظيف برمجية (Matlab) في المحاكاة و الهدف منها هو اسغلال النتائج التّجريبية من أجل استخلاص مختلف وسائط المكثّفة لمعرفة الأسباب المساعدة في التّقليل من هذا التيار.

الكلمات المفتاحية:

المكثّفة MOS، MOSFET، نمذجة، تيار الفقد، تيار فولر-نوردهايم.

Abstract

With the development of MOSFET transistors to the nanoscale (reducing the dimensions of the MOSFET to the manometer), the scientists took into account two main factors, which are how to transfer information at a high speed with a reduction in dimensions. In conjunction with this race in manufacturing, the so-called loss current appeared at the level of the capacitor MOS, especially through the insulator, which may cause damage to the compound if its intensity is high and thus corruption of the microprocessor, which made us interested

in modelling this current by identifying the structure of the MOS capacitor and its operating systems and employing the Matlab software in the simulation, the aim of which is to exploit the experimental results in extracting the various physics parameters to find out the reasons that help reduce this current.

Keywords:

Capacitor MOS, MOSFETS, current Fowler–Nordheim, Curent Poole–Frenkel,...

1-المدخل (Introduction):

تعتبر المكثفة موص (MOS) والتي أخذت هذه التسمية من خلال المقطع العمودي لبنيتها Métal/oxide/Semiconducteur (معدن/أكسيد/شبه ناقل) اللبنة الأساسية للدارات المتكاملة المكونة لمختلف المركبات الإلكترونية المستعملة اليوم.

في الأصل التسمية العامة هي (MIS) وهي اختصار لـ (Métal/isolant/semiconducteur) والتي معناها (ناقل/عازل/شبه ناقل) والمكثفة موص حالة خاصة أين يكون العازل عبارة عن أكسيد. تعتبر المكثفة موص مكون رئيس من مكونات الترانزستور موصفت (MOSFET) (transistor à effet de champ) ترانزستور ذو تأثير الحقل) أو (MOS field effect) والذي تم اختراعه من طرف المهندس المصري محمد عطا الله و المهندس الكوري داون كانغ (Dawon kahng) و (E Labate) عام 1959 حيث كان أول ترانزستور يمكن تصغيره و انتاجه بكميات كبيرة لمجموعة كبيرة من الاستخدامات (رقائق الذاكرة و المعالجات الدقيقة) مما أحدث ثورة في صناعة الالكترونيات و أنظمة الاتصالات الرقمية. أدى تصغير الموصفت إلى تحسين وزيادة الأداء والسرعة وخفض استهلاك الطاقة لشرائح الدارات المتكاملة.

المعالج الدقيق الذي لا يزال إلى غاية اليوم و المصمم من طرف شركة إنتال (INTEL) كان يحوي 2300 ترانزستور (NMOS) سنة 1973 بطول بوابة (longueur de Grille) $10\mu m$ ، أما في وقتنا الحالي فهي تقارب 2 مليار ترانزستور بسمك طبقات من الذرات فقط. هذا التطور الفائق أدى إلى ظهور تيار فقد في مكثفة الموص خصوصا على مستوى العازل نظرا لتصغير سمكه، وهو موضوع بحثنا، حيث سنهتم بنمذجته. في هذا البحث سوف نعطي دراسة كيفية وكمية لكل من الشحنة المتجمعة بين طرفي المكثفة وكذا تغيرات السعة بدلالة مقدار مهم يسمى كمون السطح ويرمز له بالرمز V_s ونود أن نحيط القارئ علما أنه لا توجد لحد الساعة وسيلة قياس تسمح لنا بحسابه مباشرة بل يقوم الباحثون باستنتاجه من خلال معادلة بواسون وتعتبر الطريقة الكلاسيكية ناهيك عن وجود طريقة كوانتية أخرى أدق.

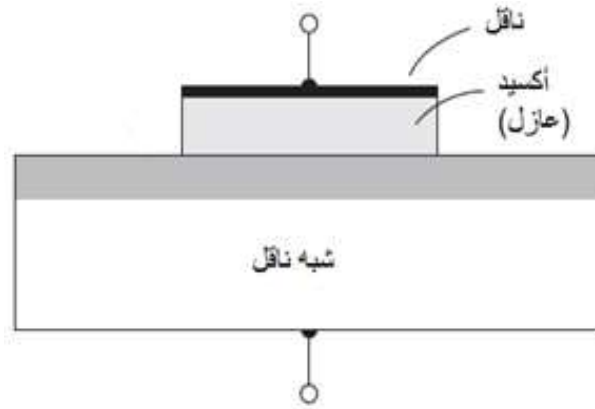
كذلك سوف نتحدث عن مختلف نماذج تيار الفقد في المكثفة موص ابتداء من نموذج تيار فاوولر-نوردهايم (Nordheim، 1928) والذي يعد دراسة نظرية قديمة لكنها أثبتت جدارتها في الوقت الراهن خصوصا بعد تطور أجهزة القياس والتي تسمح بقياس تغيرات تيار الفقد بدلالة الكمون المطبق على المكثفة أو تغيرات السعة بدلالة تغيرات الكمون المطبق أكدت وجود تطابق إلى حد كبير بين الدراسة النظرية والدراسة التجريبية.

في حقيقة الحال هناك عدة دراسات تاريخية مسبقة لمختلف نماذج التيار المحتمل وجودها وهي مدرجة في قائمة المراجع لكن أود التركيز على بعض الكتب أذكر منها كتاب كل من العالمين نيكوليون وبرائوس (Nicollian و Brews، 1982) والذي يتكوّن من 917 صفحة كلها تتحدّث عن المكثفة موص من ألف إلى ياء لمن أراد التعمّق والتخصّص؛ وكتاب عبد الحميد بن طرزي (Bentarzi, 2011) للمبتدئين؛ كذلك نذكر أبحاث بعض العلماء المتقدّمين والذين قاموا بإعطاء نماذج جديدة وعامة لتيار فاو-نوردهايم وهم (G. Pananakakis et al, 1995) كذلك العالم (Waters, 2000) Martin Le-Huu (Le-Huu, 2011) وهناك دراسات عديدة ومتنوعة لم أذكرها كذلك توجد بعض الكتب تحدّثت عن تيار الفقد في فصل من فصولها ولم تقردّها ببحث خاص.

2-المواد والطرائق (Materials and Methods):

1) مكثفة الموص (MOS) المثالية Capacité MOS idéale

تتكوّن المكثفة MOS المثالية من 3 طبقات: الطبقة العلوية وهي عبارة عن ناقل (معدن) أو شبه ناقل جدّ مطعم الطبقة الوسطى وهي عبارة عن عازل و يكون أكسيذا، عادة يفضل ثاني أكسيد السيليسيوم الغالب في الاستعمال التكنولوجي، تكون أبعاد هذه الطبقة بالنانومتر، أما الطبقة السفلى فهي عبارة عن شبه ناقل أبعاده حوالي $(1/10)mm$ (Neamen, 2003).



شكل 1 مقطع عمودي لبنية مكثفة الموص (Neamen, 2003)

نقول عن المكثفة MOS أنها مثالية (Mathieu, 2009) عندما يكون العازل مثاليا 100% بمعنى أنه يعزل مرور التيار من الناقل إلى شبه الناقل أو العكس، كذلك يكون جهدا الاستخراج للناقل وشبه الناقل متساويين $\phi_m = \phi_s$.

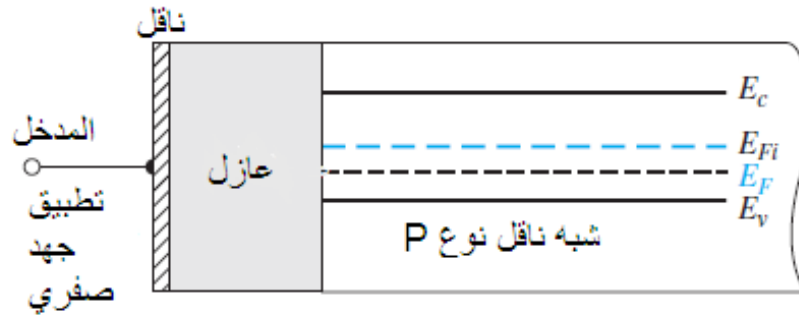
عمل الاستخراج هو العمل اللازم لاستخراج الإلكترون من المعدن إلى الفراغ، و هو الحد الأدنى من الطاقة المقاسة بالإلكترون فولط eV الضرورية لسحب الإلكترون من مستوى فيرمي E_F إلى مستوى الفراغ Niveau du vide. في المكثفة MOS يتميز المعدن بعمل الاستخراج يرمز له بـ $e\phi_m$ ، كما يتميز شبه الناقل بعمل الاستخراج يرمز له بـ $e\phi_s$ و عليه نعرف الجهد الموافق لكل عمل بـ ϕ_s و ϕ_m .

(2) أنظمة التشغيل:

إن سلوك المكثفة في الدارة يتعلق بنوع الاستقطاب وشدة الجهد المطبق عليها ونوع شبه الناقل. هناك أربع أنظمة سواء كان شبه الناقل من نوع P أم من نوع N وهي: نظام الأشرطة (العصابات) المستوية، نظام التجميع، نظام الهجرة ونظام الانقلاب.

(أ) نظام الأشرطة (العصابات) المستوية (Régime de bande plate):

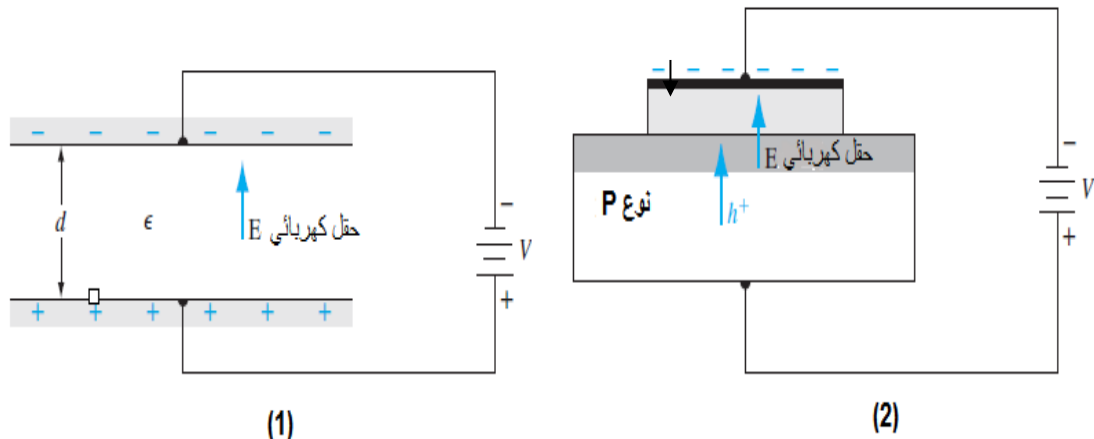
يتحقق هذا النظام عند تطبيق جهد يسمح ببقاء الأشرطة (العصابات) مستوية، في حالة المكثفة المثالية يكون الجهد المطبق بين طرفي المكثفة موصل صفريا ($V=0$)، أي لا وجود للفرق في الكمون بين المعدن و شبه ناقل و بالتالي غياب الحقل الكهربائي $\vec{E}$. يكون المخطط الطاقوي الخاص بالمكثفة موصل في هذه الحالة كما يلي:



شكل 2 شكل توضيحي للمستويات الطاقوية الخاصة بنظام الأشرطة المستوية (Neamen, 2003) نلاحظ أن المستويات الطاقوية غير منحنية، لذلك سميت هذه الحالة ب: نظام الأشرطة (العصابات) المستوية. جهد المدخل الذي يؤدي لتشكل أشرطة مستوية (flat band) يرمز له بالرمز V_{FB} ، ويساوي الفرق بين جهدي الاستخراج لكل من الناقل وشبه الناقل ، و هذا ما نترجمه بالعلاقة التالية $V_{FB} = \phi_m - \phi_s$ في المكثفة المثالية يكون $\phi_m = \phi_s$ ، اذا الكمون الواجب تطبيقه على المكثفة يجب أن يكون معدوما ، أما في المكثفة الحقيقية يكون $\phi_m \neq \phi_s$ ، وعليه للحصول على نظام الأشرطة (العصابات) المستوية يجب تطبيق جهد معين غير معدوم.

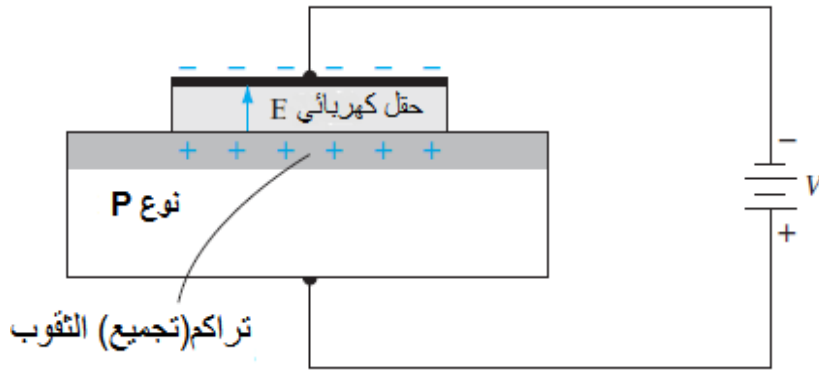
(ب) نظام التراكم (Régime d'accumulation):

يتحقق هذا النظام عند تطبيق جهد يسمح بتجمع حاملات الشحنة الحرة في السطح الفاصل بين شبه الناقل والعازل، في حالة شبه ناقل P نطبق الجهد السالب. لتبسيط فهم سلوك المكثفة موصل عند تطبيق جهد، نتطرق لسلوك مكثفة مستوية وهذا ما يوضحه الشكل (3).



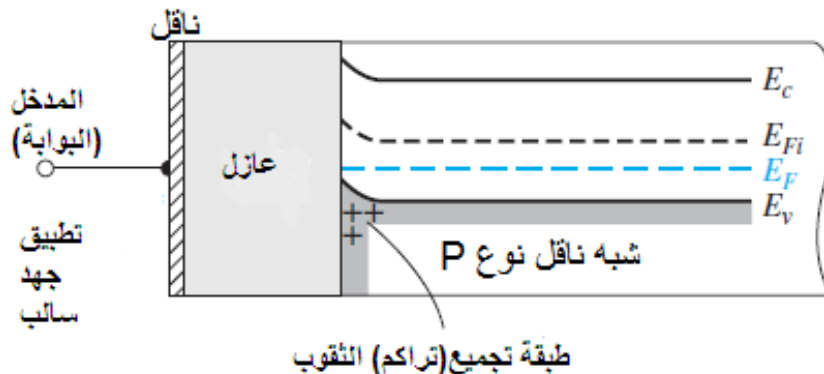
شكل 3 مخطط توضيحي لكيفية توزيع الشحن في المكثفة المستوية (1) ومكثفة الموصل (2) (Neamen D. , 2003)

عند تطبيق جهد سالب $V < 0$ بين طرفي مكثفة موصل ، تتوزع الشحن السالبة على سطح الناقل و الشحن الموجبة على شبه الناقل و نتيجة لوجود فرق في الكمون ينشأ حقل كهربائي $\vec{E}$ من الكمون المرتفع (مكان تركز الشحن الموجبة) إلى الكمون المنخفض (مكان تركز الشحن السالبة) ، مع العلم أنه في حالة شبه ناقل من النوع P يكون لدينا عدد الثقوب أكبر من عدد الإلكترونات الحرة وبالتالي ستتجمع الثقوب و تتراكم على سطح شبه الناقل أي في الحد الفاصل بين العازل و شبه الناقل كما هو موضح في الشكل (4) .



شكل 4 مخطط توضيحي لتراكم الثقوب (Neamen, 2003)

يأخذ المخطط الطاقوي الخاص بهذا النظام الشكل التالي:

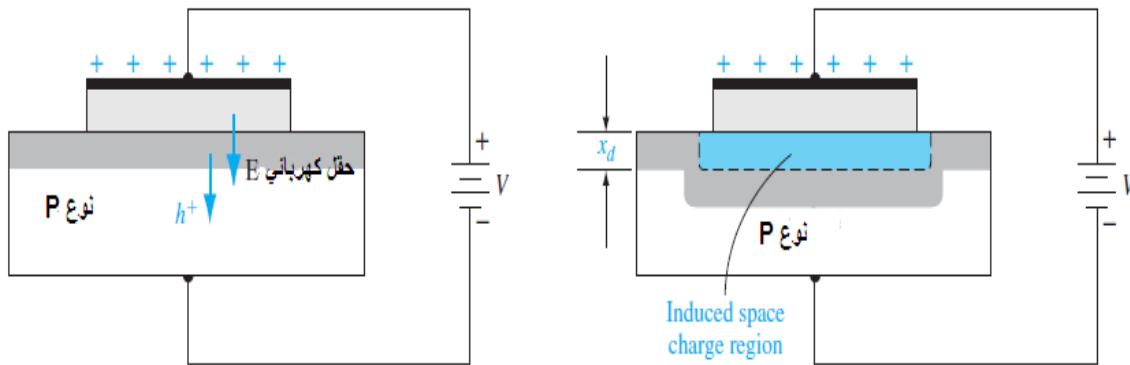


شكل 5 شكل توضيحي للمستويات الطاقوية الخاصة بنظام التراكم (Neamen D. , 2003)

نلاحظ أن كل المستويات الطاقوية E_{Fi} , E_c , E_v حدث لها انحناء عند السطح الفاصل بين شبه الناقل و العازل وتتشكل طبقة تجمع الثقوب أعلى شريط (عصابة) التكافؤ.

(ج) نظام الهجرة (Régime de déplétion):

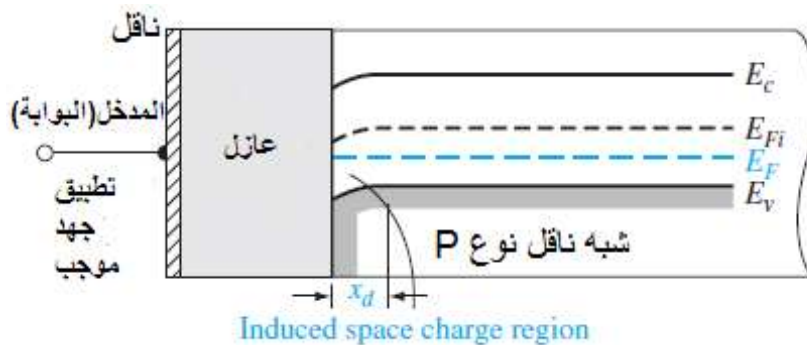
يتحقق هذا النظام عند تطبيق جهد يسمح بتكوين منطقة مفرغة من الشحن الحرة في السطح الفاصل بين شبه الناقل والعازل، أي تهجر هذه الشحن من تلك المنطقة، في هذه الحالة قيمة الجهد المطبق تكون $0 < V < \phi_{Fi}$ (جهد موجب) بحيث $e\phi_{Fi} = E_F - E_{Fi}$.



شكل 6 مخطط توضيحي لكيفية توزيع الشحن عند تطبيق جهد موجب (Neamen D. , 2003)

عند تطبيق جهد موجب، الشحن الموجبة في هذه الحالة تتواجد على سطح الناقل و بالتالي ستتغير جهة الحقل الكهربائي لتحقيق التوزيع المنتظم و المتوازن للشحن الكهربائية في مكثفة الموصل، الحقل الناشئ سيؤثر على الثقوب المتواجدة في شبه الناقل فيدفعها نحو الأسفل مما يتسبب في هجرتها تاركة خلفها منطقة مفرغة من الشحن الحرة (zone de charge d'espace) عرضها x_d ، و تبقى شحن ثابتة سالبة في تلك المنطقة راجعة للذرة المستقبلية.

الشكل التالي يوضح المخطط الطاقوي لهذا النظام:



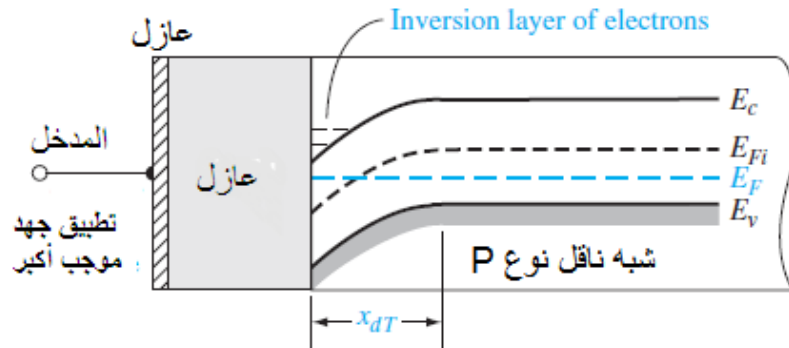
شكل 7 شكل توضيحي للمستويات الطاقوية الخاصة بنظام الهجرة (Neamen D. , 2003)

تنحني المستويات الطاقوية نحو الأسفل ما عدا مستوى فيرمي، عند السطح الفاصل بين شبه الناقل والعازل وتتشكل طبقة مفرغة من حاملات الشحن الحرة في تلك المنطقة وأيضا في أعلى أشطرة (عصابات) التكافؤ.

(د) نظام الانقلاب (Régime d'inversion):

يتحقق هذا النظام عند تطبيق جهد يسمح بتغيير نوع شبه الناقل في السطح الفاصل بين شبه الناقل و العازل في هذه الحالة تكون شدة الجهد المطبق: $V > \phi_{Fi}$.

عند الزيادة التدريجية في شدة الجهد يزداد عرض المنطقة المفرغة من الشحن و تنحني المستويات الطاقوية أكثر عند السطح الفاصل، ما يجعل أدنى مستوى لشريط (عصابة) النقل أقرب لمستوى فيرمي من أعلى مستوى لشريط (عصابة) التكافؤ و هذا ما يميز شبه ناقل نوع N إذا يتغير نوع شبه الناقل من P إلى N في تلك المنطقة بينما تبقى المستويات على حالها أي يبقى الشبه ناقل من النوع P خارج المنطقة المفرغة من حاملات الشحن الحرة، و هذا ما يوضحه الشكل (8) .



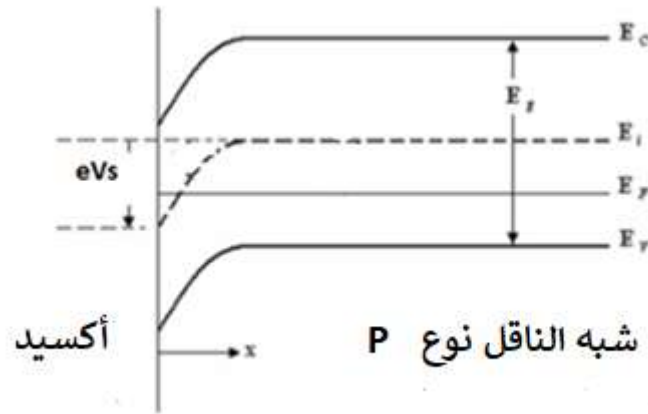
شكل 8 توضيحي للمستويات الطاقوية الخاصة بنظام الانقلاب (Neamen D. , 2003)

نستعمل في هذه الدراسة برمجية Matlab وهذا لمحاكاة سلوك المكثفة من خلال تغيير شحناتها وسعتها بتغيير الاستقطاب كذلك سوف نحكي التيار الضائع على مستوى العازل، كل هذا باستخدام مختلف النماذج الرياضية المقترحة من قبل العلماء .

4-النتائج والمناقشة (Results and Discussion):**(3) الشحنة في مكثفة الموص المثالية (Mathieu, 2009)**

تتعلق الشحنة والسعة وكل المقادير الأخرى المميّزة لمكثفة الموص بمقدار مهم وهو كمون السطح يرمز له بـ V_s ، ويمثل العمل المرافق لهذا الجهد الفرق بين مستوي فرمي الذاتي في حجم شبه الناقل ومستوي فرمي الذاتي في السطح الفاصل مع العازل الشكل (9)، و هذا ما نترجمه بالعلاقة (1):

$$(1) \quad eVs = E_{F_{volume}} - E_{F_{surface}}$$



شكل 9 مخطط طاقي توضيحي لكمون السطح (Mathieu, 2009)

سوف نتطرق في هذه المقالة العلمية لعبارة الشحنة و تغيراتها في حالة شبه ناقل من نوع P:

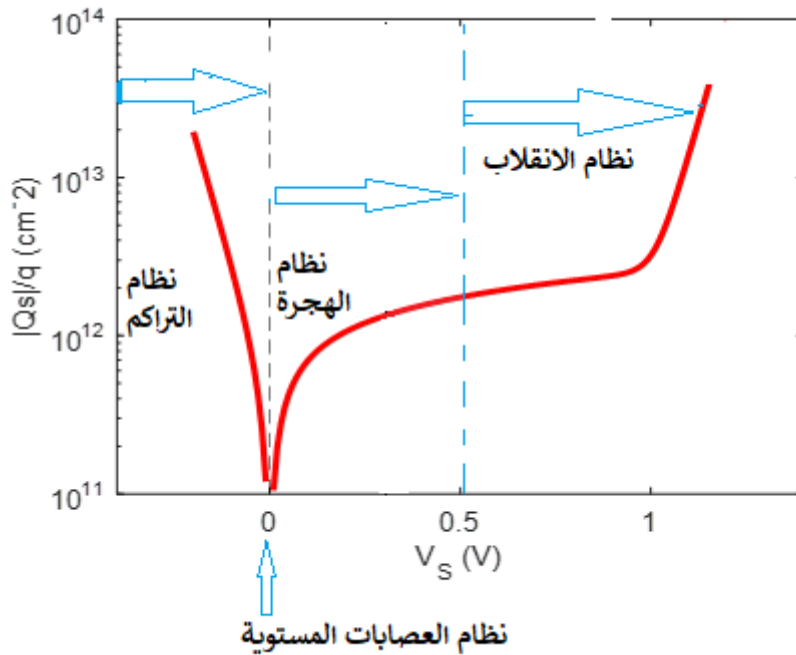
(4) عبارة الشحنة في مكثفة الموصل (Nicollan & Brews, 1982)

تعطى عبارات الشحنة الكلية الناشئة في شبه الناقل كالتالي:

$$(2) \quad Q_{SC} = \pm \left(\frac{kT}{e} \right) \frac{\epsilon_{SC} \sqrt{2}}{L_D} \left[e^{-eV_s/kT} + \frac{eV_s}{kT} - 1 + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{eV_s/kT} - \frac{eV_s}{kT} - 1 \right) \right]^{1/2} = -Q_{metal}$$

حيث $\epsilon_{SC}, e, k, T, L_D, n_0, p_0$ هي على الترتيب تركيز الثقوب في شبه الناقل، تركيز الالكترونات، طول ديبي، درجة الحرارة بوحدة الكالفين، ثابت بولتزمان، شحنة الالكترون، السماحية في شبه الناقل.

يمكننا محاكاة تغيرات الشحنة بدلالة كمون السطح لمكثفة الموصل (نوع P) في درجة حرارة الغرفة مع الأخذ بالقيمة العددية لـ $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ وباستعمال برمجية Matlab نحصل على الشكل (10).



شكل 10 شكل توضيحي لكيفية تغير الشحنة بدلالة كمون السطح بالمحاكاة

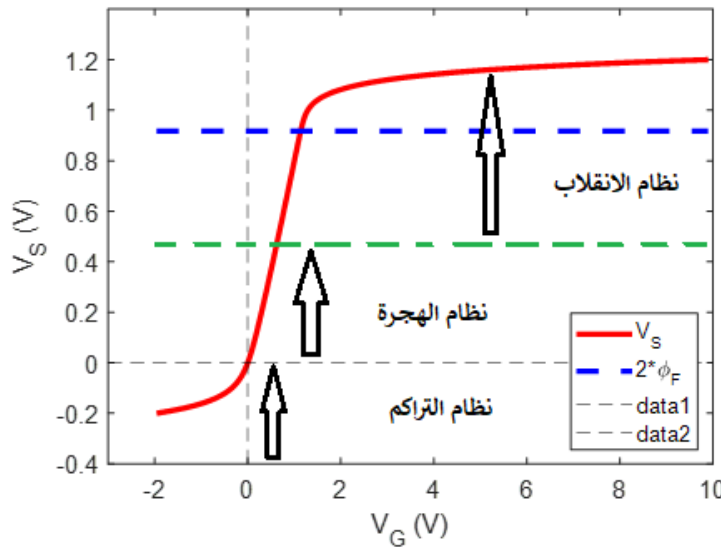
عند تطبيق جهد بين طرفي مكثفة الموصل يتوزع جزء منه على العازل والباقي يتوزع على شبه الناقل وذلك حسب المعادلة (3):

$$(3) \quad V_G = V_{ox} + V_s = \frac{-Q_{sc}}{C_{ox}} + V_s$$

ويمكننا بسهولة الوصول للمعادلة (4):

$$(4) \quad V_G - V_s = V_{ox} = -Q_{sc} / C_{ox}$$

كما يمكننا أيضا محاكاة تغيرات كمون السطح V_s بدلالة كمون البوابة V_G لمكثفة الموصل (نوع P) في درجة حرارة الغرفة حيث: $N_A = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ و $\epsilon_{rox} = 4$ ، $t_{ox} = 2 \text{ nm}$ ، $V_{FB} = 0$ حيث t_{ox} يمثل سمك العازل مع العلم أن $V_{FB} = \phi_m - \phi_s$ الشكل (11):



شكل 11 شكل توضيحي لتغيرات كمون السطح بدلالة كمون البوابة باستعمال المحاكاة

جهد العتبة V_T

هو الجهد اللازم للانتقال إلى نظام الانقلاب القوي، أي عندما يكون $V_s = 2\phi_{Fi}$ مع العلم أن:

$$(5) \quad e\phi_{Fi} = E_F - E_{Fi}$$

نتحصل على نظام الهجرة عندما يكون $V_s < \phi_{Fi}$ بينما نتحصل على نظام الانقلاب عندما يكون $V_s > \phi_{Fi}$

(5) السعة (Mathieu, 2009)

بما أن الجهد المطبق على المكثفة موصل يتوزع على العازل وشبه الناقل، فإن سعة المكثفة C هي السعة

المكافئة لسعة العازل وسعة شبه الناقل، وتكتب عبارة سعة المكثفة موصل بالمعادلة (6):

$$(6) \quad 1/C = 1/C_{ox} + 1/(C_s + C_{dep})$$

حيث عبارة كل من سعة العازل C_{ox} وسعة الشبه ناقل C_{sc} تكتب وفق العلاقتين (7)(8):

$$(7) \quad C_{ox} = Q_m / (V_G - V_s) = \epsilon_{ox} / t_{ox}$$

$$(8) \quad C_{sc} = C_s + C_{dep} = -dQ_{sc} / dV_s$$

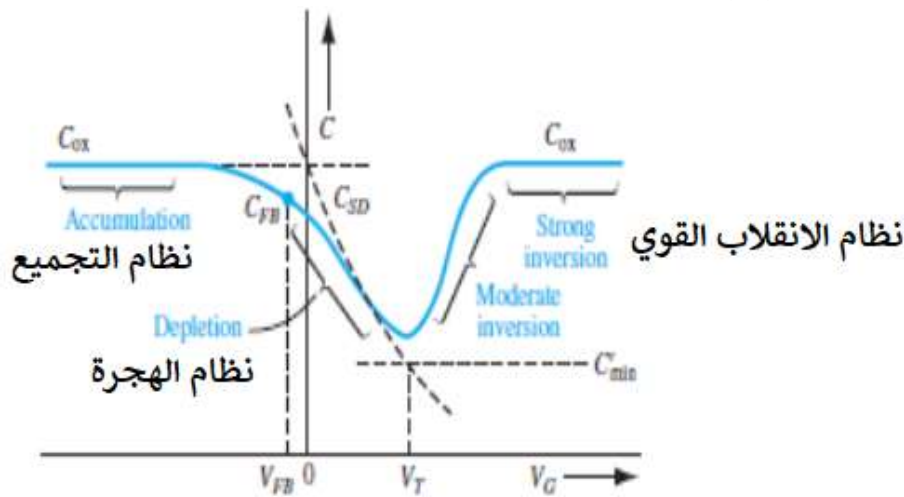
نلاحظ من العلاقات السابقة أنه بمعرفة الشحنة يمكن معرفة سعة شبه الناقل، وكما هو معلوم فإن شبه الناقل يتكون من حاملات شحن حرة Q_s (الإلكترونات والثقوب) وشحنات ثابتة Q_{dep} (الأيونات المستقبلية والأيونات المانحة)، فتكون شحنة شبه الناقل وفق المعادلة (9):

$$(9) \quad Q_{sc} = Q_s + Q_{dep}$$

وعليه تصبح سعة شبه الناقل كما يلي (10):

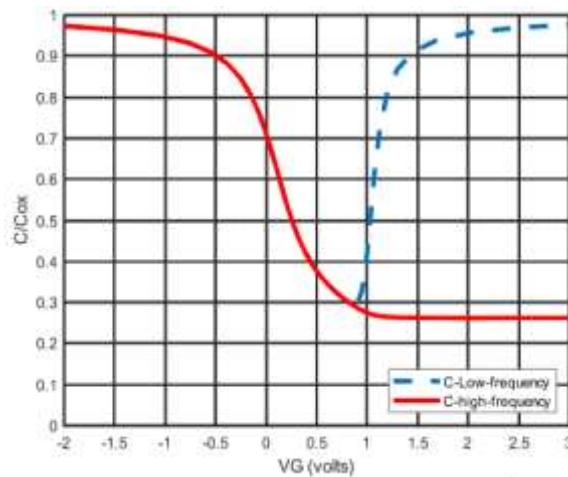
$$(10) \quad C_{sc} = \frac{-dQ_{sc}}{dV_s} = C_s + C_{dep}$$

بما أن الشحنة متغيرة (تتغير بدلالة V_s) يستوجب أن السعة تكون متغيرة، لذا فإن لكل نظام تشغيل سعة خاصة به كما يوضحه الشكل (12).



شكل 12 منحنى تغير سعة المكثفة بدلالة جهد البوابة (Neamen, 2003)

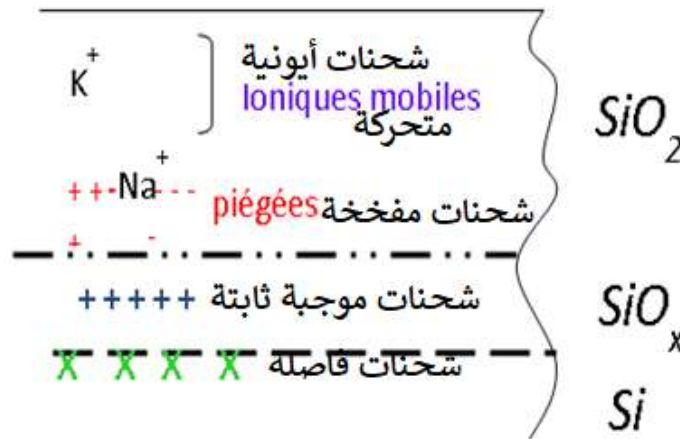
نلاحظ أننا من خلال منحنى السعة بدلالة الجهد نستطيع استخلاص عدة وسائط منها، سمك العازل t_{ox} وجهد العتبة V_T والجهد اللازم للحصول على العصابات المستوية V_{FB} . كذلك استطعنا محاكاة تغيرات السعة بدلالة كمون البوابة V_G والنتائج التي حصلنا عليها والممثلة في الشكل (13) كانت متوافقة مع نتائج (Pierret, 1996).



شكل 13 منحني تغيير سعة المكثفة بدلالة جهد البوابة باستعمال المحاكاة

(6) مكثفة الموص الحقيقية (Bentarzi, 2011) Capacité MOS réelle

في مكثفة الموص الحقيقية يكون العازل غير مثالي أي يسمح بمرور التيار (نظرا لوجود عيوب و شحنات فيه)، إضافة إلى أن جهدي الاستخراج للناقل وشبه الناقل ليسا بالضرورة متساويين والشكل (14) يوضح مختلف الشحن سواء كانت متحركة أم مفخخة أم ثابتة، كذلك المتواجدة في السطح الفاصل بين العازل وشبه الناقل.



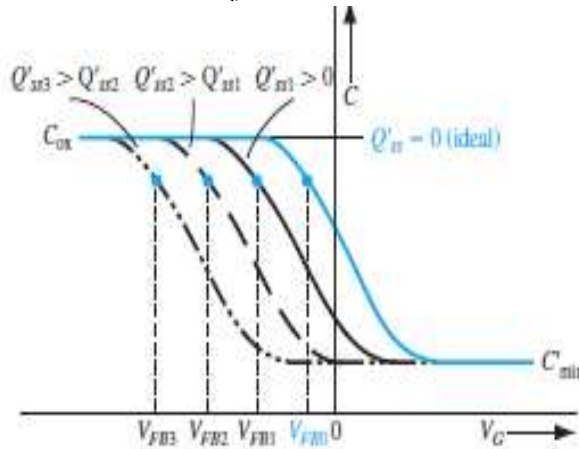
شكل 14 مخطط توضيحي لبعض الشحن الموجودة في المكثفة الحقيقية

تنتج هذه الأيونات والعيوب أثناء عملية التصنيع وتنشأ من خلال الاختلاف في الترتيب البلوري خصوصا في السطح الفاصل وتلعب دورا أساسيا في نقل التيار (تيار ضائع) حسب موقعها في العازل. في هذه الحالة يصبح كمون العصابات المستوية (Flat Band) V_{FB} الذي تحدثنا عنه سابقا يكتب على الشكل:

$$(11) \quad V_{FB} = \phi_m - \phi_s - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

حيث تمثل Q_{ss} الشحنة الكهربائية في السطح الفاصل بين العازل وشبه الناقل.

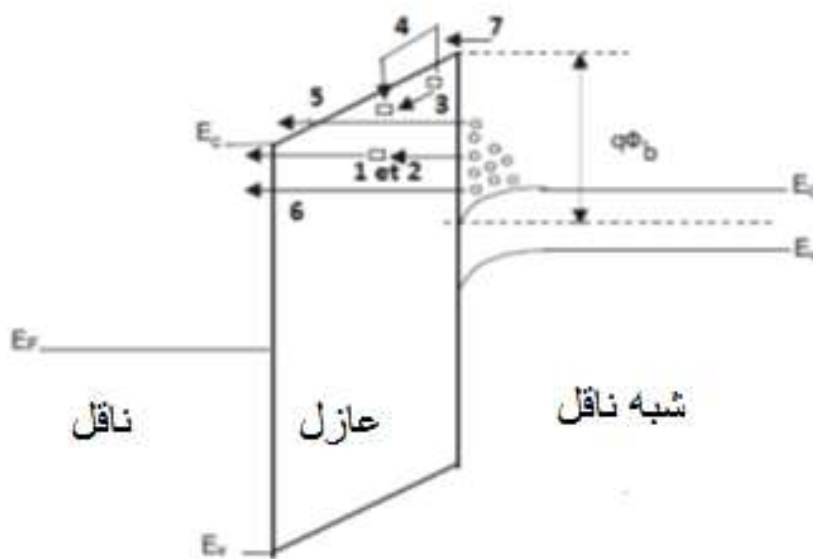
فيما يخص منحني تغيير سعة المكثفة الحقيقية بدلالة الجهد المطبق يكون له شكل مماثل للمكثفة المثالية مع إزاحة بمقدار $\Delta V = V_{FB}$ (Neamen, 2003) كما هو موضح في الشكل (15):



شكل 15 تغيرات المكثفة الحقيقية بدلالة جهد البوابة (Neamen, 2003)

7) مختلف نماذج تيار الفقد في المكثفة موص:

سوف نتطرق لمختلف نماذج تيار الفقد عبر العازل الموجود في المكثفة موص حيث سوف نرى أنه في بعض الحالات يكون أوميا بمقاومية عالية للعازل وفي بعض الحالات الإلكترونات تستطيع التثقل بحرية داخل طبقة العازل (فعل شوتكي) (effet Schottky)، فعل تينال (effet tunnel) تيار تينال فاوئر نوردهايم - courant Fowler-Nordheim) وفي بعض الحالات يتم نقل الإلكترونات بمساعدة الشحنات الموجودة في العازل (تيار بول-فرانكل Nordheim) وفي بعض الحالات يتم نقل الإلكترونات بمساعدة الشحنات الموجودة في العازل (تيار بول-فرانكل Nordheim) وفي بعض الحالات يتم نقل الإلكترونات بمساعدة الشحنات الموجودة في العازل (تيار بول-فرانكل Nordheim) شدته عالية كتيار النفق فاوئر نوردهايم (courant Fowler-Nordheim)، كل هاته النماذج موضحة في الشكل (16).



شكل 16 مخطط طاقي يوضح مختلف نماذج تيار الفقد في المكثفة موص (Bentarzi, 2011)

حيث نرمز للأرقام من 1 إلى 7 والتي تمثل مايلي:

آلية التوصيل الأومي Mécanisme de conduction Ohmique .

1. آلية التوصيل Trap-Filled-Limit (TFL) Mécanisme de conduction .
2. آلية التوصيل بالشحنات النفقية (TAT) Mécanisme de conduction assisté par pièges .
3. آلية توصيل بول وفرانكل (PF) Mécanisme de conduction Poole-Frenkel .
4. آلية توصيل فاوولر ونوردهايم (FN) Mécanisme de conduction tunnel Fowler -Nordheim .
5. آلية توصيل تينال (TD) Mécanisme de conduction Tunnel Direct .
6. آلية توصيل الانبعاث الأيوني الحراري Mécanisme de conduction Thermoïonique .

• **آلية التوصيل الأومي (نظام الحقن الضعيف) Régime d'injection faible**

ينشأ هذا النظام من أجل قيم ضعيفة ومنخفضة للحقل الكهربائي مما يسمح بنقل التيار لأن كثافة حاملات الشحن المحقونة في المادة ضئيلة.

تعطى عبارة كثافة التيار الكهربائي كالاتي (Sze, 2007) (Bentarzi, 2011):

$$(12) \quad J_{ohm} = \sigma \times E_{ox}$$

حيث:

σ : الناقلية الكهربائية في العازل.

E_{ox} : شدة الحقل الكهربائي في العازل.

J_{ohm} : كثافة التيار الكهربائي.

• **آلية التوصيل (TFL) (نظام الحقن القوي) Régime d'injection forte**

عندما تزداد شدة الحقل الكهربائي المطبق على المكثفة، تمتلئ الشحنات النفقية تدريجيا حيث تتناسب طردا مع هذه الزيادة فتصبح كثافة حاملات المحقونة في المادة أكبر.

يصبح التغير بدلالة الحقل الكهربائي أسيا و تعطى عبارة كثافة التيار تعطى بالعلاقة (Sze, 2007) (R.Perera, 2003):

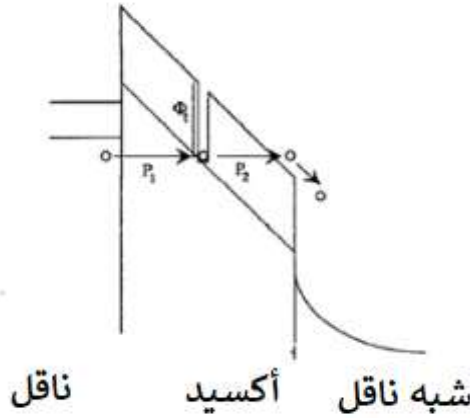
$$(13) \quad J_{FTL} = B \times E_{ox}^n$$

حيث: B و n : ثوابت .

• **آلية التوصيل بالشحنات النفقية Mécanisme de conduction assisté par pièges (trap assisted tunneling) TAT**

يحدث على مرحلتين:

في بادئ الأمر الإلكترونات تخترق الحاجز بمفعول النفق المحلي (efffet tunnel local) ثم يحدث القفز بين الشحنات المفخخة وهذا عندما تكون طاقة الإلكترونات أقل من القيمة الأعظمية للحاجز الطاقوي بين الشحنات النفقية (الشكل 17).



شكل 17 مخطط طاقي يبين تيار TAT في مكثفة MOS

لقد أنشأ فليشر وآخرون (Flesischer, 1992) صيغة مبسطة كالتالي:

$$(14) \quad J_{TAT} = \frac{2qC_t N_t \phi_t \exp((-D \times E_{ox}) \phi_t^{3/2})}{3E_{ox}}$$

$$C_t = \left(\frac{m_{poly}}{m_{ox}} \right) \frac{8E_1^{3/2}}{3\hbar \sqrt{\phi_t - E_1}} \quad \text{و} \quad D = 4\sqrt{2qm_{ox}} / 3\hbar$$

حيث N_t : كثافة الشحنت النقيّة.

q : الشحنة الكهربائية.

m_{ox} : الكتلة الفعالة للإلكترون داخل الأكسيد.

m_{poly} : الكتلة الفعالة للإلكترون داخل البولي سيليسيوم.

$\hbar$: ثابت بلانك المختزل.

E_{ox} : الحقل الكهربائي داخل الأكسيد.

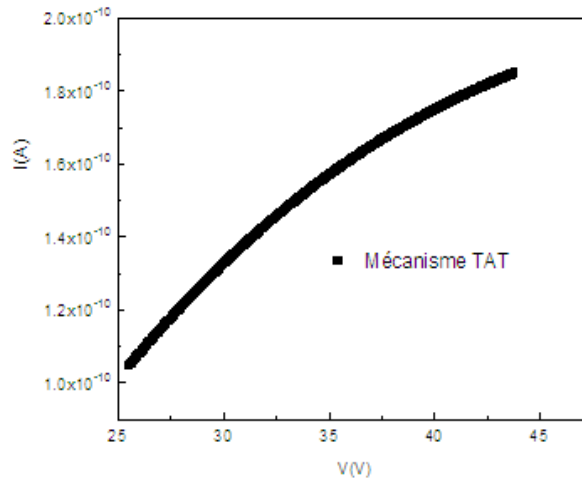
ϕ_t : المستوى الطاقي للشحنت النقيّة.

E_1 : الطاقة الكلية للإلكترون.

C_t : مركبة متعلقة بالكتلة الفعالة للأكسيد والبولي سيليسيوم.

قمنا بمحاكاة التيار بين طرفي المكثفة بدلالة الكمون $I(V)$ باستعمال برمجية Matlab وذلك باستخدام المعادلة

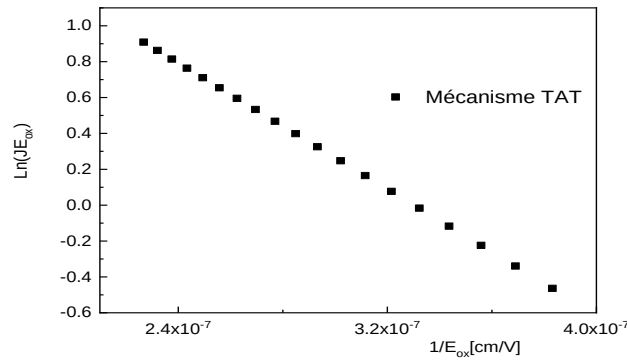
(14)



شكل 18 نمذجة $I(V)$ لمكثفة موص يوضح تيار TAT(trap assisted tunneling) يمكننا إعادة كتابة المعادلة (14) في صورة مختلفة على شكل معادلة خط مستقيم الشكل (19) وهذا حسب المعادلة (15):

$$(15) \quad \ln(J \times E_{ox}) = (-D\phi_t^{3/2}) \frac{1}{E_{ox}} + \ln((2/3)qC_t N_t \phi_t)$$

وبالتالي نتحصل على الشكل الآتي:



شكل 19 منحنى $\ln(JE_{ox})$ بدلالة $1/E_{ox}$ لمكثفة موص من أجل تيار TAT وعليه فقد تعلمنا طريقة نتعرف بها على وجود الظاهرة أو آلية التوصيل من خلال نتائج تجريبية. حيث يمكننا استنتاج كثافة التيار J وهذا من خلال العبارة:

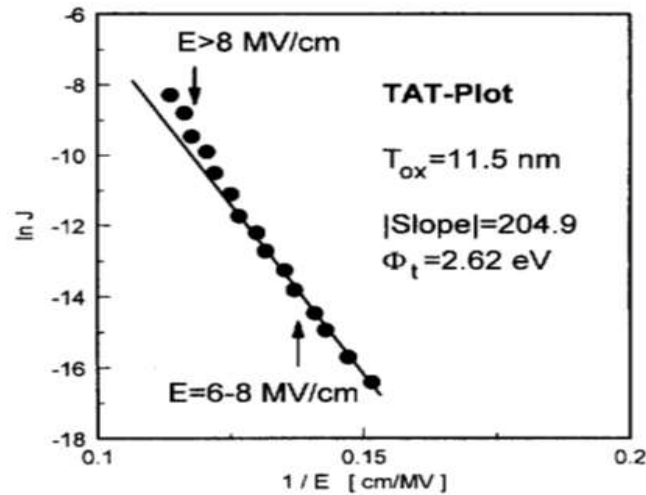
$I = J \times S$ حيث S هي مساحة مقطع سطح الناقل وكذلك يمكننا استنتاج شدة الحقل الكهربائي وهذا من

$$E_{ox} = \frac{V}{t_{ox}} \quad \text{خلال العلاقة}$$

وبعد رسم البيان $\ln(JE_{ox})$ بدلالة $\frac{1}{E_{ox}}$ ، ننظر للمنحنى فإن أعطى لنا خطاً مستقيماً آنذاك يمكننا القول

أن ظاهرة نقل التيار TAT موجودة كذلك بصيغة أخرى يمكننا رسم البيان $\ln(IV)$ بدلالة $\frac{1}{V}$.

نعرض بعض النتائج التجريبية لتيار TAT (Cheng, 1988):

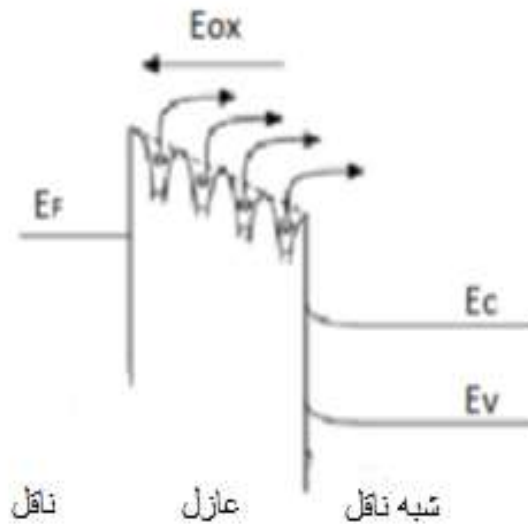


شكل 20 بيان تجريبي يوضح تيار TAT

من خلال البيان التجريبي الشكل (20) نلاحظ أن البيان $\ln(JE_{ox})$ بدلالة $1/E_{ox}$ عبارة عن خط مستقيم في مجال معين للحقل الكهربائي $[6-8 \text{ MV/cm}]$ ومن خلال الميل والمطابقة مع المعادلة (15) نستطيع استخراج عدة وسائط منها $\phi_t = 2.62 \text{ eV}$ وذلك باعتبار أن $t_{ox} = 11.5 \text{ nm}$ ومعرفة الكتلة الفعالة للإلكترون في العازل m_{ox} .

• آلية توصيل بول وفرانكل (PF) Mécanisme de conduction Poole-Frenkel (PF)

ينشأ هذا التيار عندما تكون الشحنات المفخخة بالقرب من عصابة النقل للعازل بعدها تواصل تنقلها بواسطة مفعول شوتكي من فخ لآخر، في هذا النموذج تكون العيوب هي التي تتسبب في نشأة الشحنات النقيّة الشكل (21).



شكل 21 مخطط طاقي للأشرطة الطاقويّة في المكثفة موص يوضح آلية التيار بول و فرانكل

يمكن أن يكون التعبير عن كثافة التيار الناتج عن هذه الظاهرة (Bentarzi, 2011) (R.Perera, 2003) بالعلاقة (16):

$$(16) \quad J_{PF} = (qN_c\mu)E_{ox} \exp\left(\frac{-q(\phi_t - \sqrt{qE_{ox} / \pi\epsilon_r\epsilon_0})}{k_B T}\right)$$

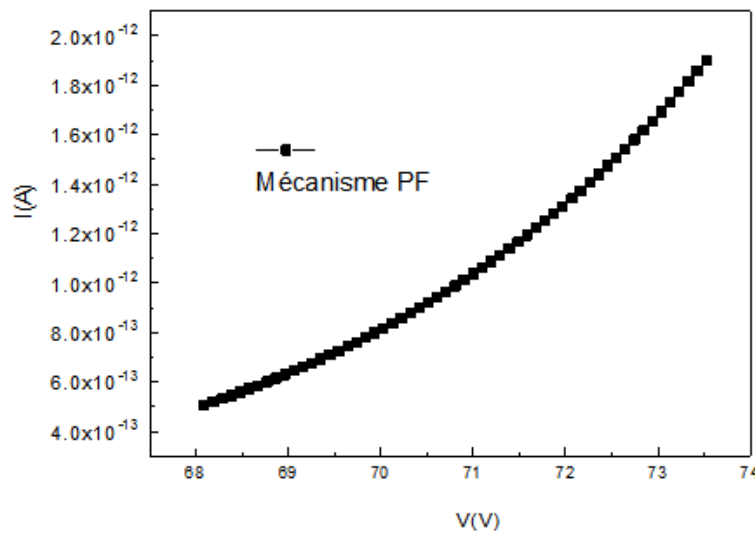
حيث:

N_c : كثافة الحالات في شريط النقل.

ϕ_t : المستوى الطاقوي للشحنات النقية.

μ : الناقلية الإلكترونية في الأكسيد.

تسمح لنا هذه العبارة بنمذجة التيار بول-فرانكل و هذا باستعمال برمجية (Matlab) الشكل (22):

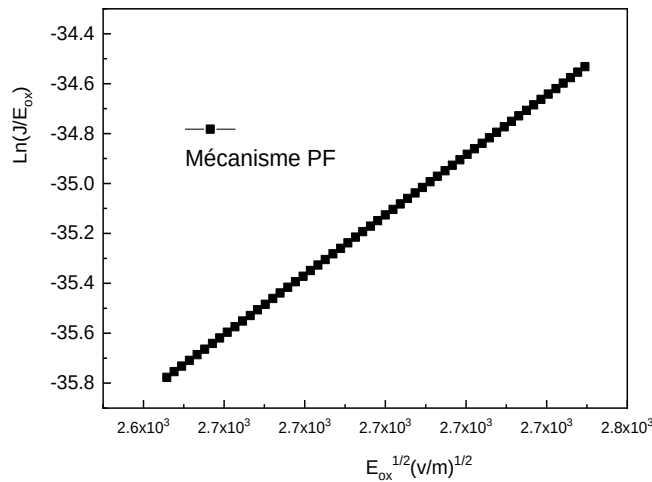


شكل 22 نمذجة I(V) لمكثفة الموصل يوضح تيار PF

يمكننا محاكاة هذه الظاهرة بصيغة أخرى وهذا بالاعتماد على المعادلة رقم (17):

$$(17) \quad \ln(J / E_{ox}) = \frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{q}{\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \sqrt{E_{ox}} - \frac{q\phi_t}{k_B T} + \ln(q\mu N_c)$$

المنحنى $\ln(J / E_{ox})$ بدلالة $\sqrt{E_{ox}}$ يعطي خطأ مستقيماً كما هو مبين في الشكل (23):



شكل 23 منحنى $\ln(J / E_{ox})$ بدلالة $\sqrt{E_{ox}}$ لمكثفة الموصل لآلية PF

باستغلال المنحنى نستطيع استخراج عدة وسائط فيزيائية مثل: ε_r و N_c .

لذلك نستطيع القول أنه إذا كانت لدينا قياسات تجريبية $I(V)$ يمكننا استنتاج كثافة التيار J وكذلك استنتاج شدة الحقل الكهربائي وبعد رسم البيان $\ln(J / E_{ox})$ بدلالة $\sqrt{E_{ox}}$ ننظر هل أعطى هذا الأخير خطأ مستقيماً فإن كان الجواب بنعم نقول أن ظاهرة نقل التيار PF موجودة. كذلك بصيغة أخرى يمكننا رسم البيان $\ln(I / V)$ بدلالة $\sqrt{V}$.

• آلية توصيل النفقي فاوئر ونوردهايم - **Mécanisme de conduction tunnel Fowler**

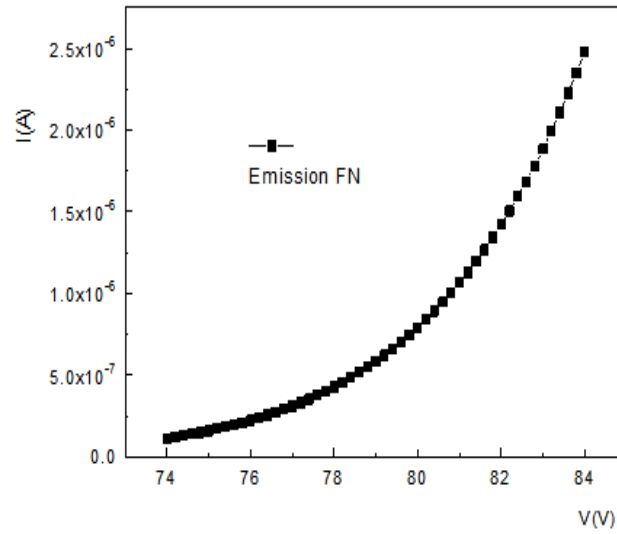
Nordheim (FN)

في حالة حقل كهربائي ذي شدة عالية، الحاجز الطاقي داخل العازل ممكن أن يمثل على شكل مثلث (الشكل 16) لكن طاقة الإلكترون تظل أقل من الحاجز للنظام (شبه ناقل-عازل) هنا نتحدث عن تيار فاوئر ونوردهايم. يستعمل الباحثون عبارة فاوئر - نوردهايم المبسطة لكنها صالحة لحد بعيد في الدراسة في درجة الحرارة العادية (Nordheim., 1928) (Bentarzi, 2011):

$$(18) \quad J_{FN}^0 = A E_{ox}^2 \exp(-B / E_{ox})$$

حيث: $A = \frac{q^3 m_{sc}}{8\pi h m_{ox} \phi_b}$ و $B = \frac{8\pi \sqrt{2m_{ox}} \phi_b^{3/2}}{3hq}$ و ϕ_b : ارتفاع الحاجز الطاقي داخل الحاجز.

تمكنا من نمذجة هذا التيار والحصول على المنحنى (الشكل 24):

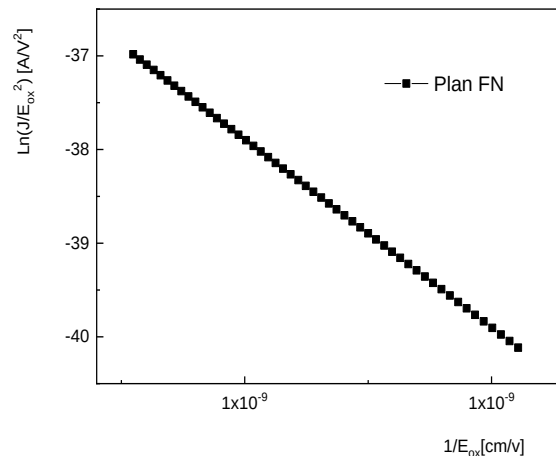


شكل 24 منحني $I(V)$ لمكثفة الموصل يوضح تيار FN

من خلال البيان (24) نستطيع استخراج عدة وسائط فيزيائية مثل ϕ_b و m_{ox} .
 يمكننا أيضا عرضه بصيغة أخرى تسمى مخطط فاو-نوردهايم (Plan Fowler-Nordheim)
 المنحني $\ln(J / E_{ox}^2)$ يعطي خطاً مستقيماً بدلالة $1 / E_{ox}$ وهذا وفقاً للعلاقة (19):

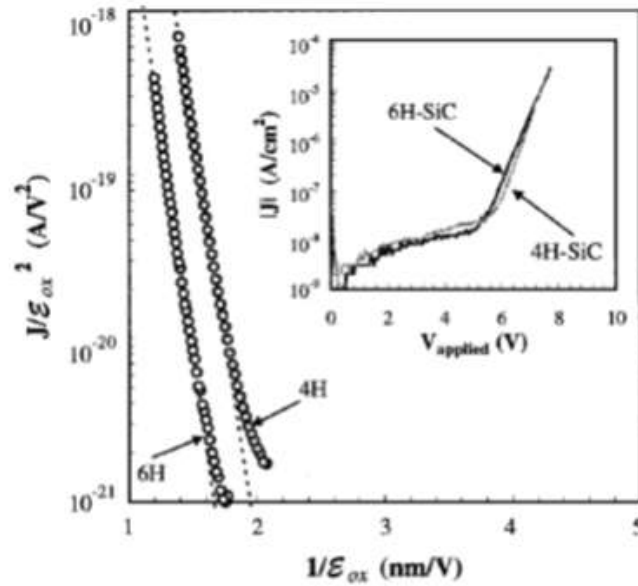
$$(19) \quad \ln(J / E_{ox}^2) = \ln(A) - B / E_{ox}$$

فنحصل على المنحني (الشكل (25):



شكل 25 منحني $\ln(J / E_{ox}^2)$ بدلالة $1 / E_{ox}$ لمكثفة الموصل يوضح آلية FN

يمكننا إعطاء نتائج تجريبية لتيار الفقد من خلال المقال العلمي الوارد في المراجع (Waters, 2000).



شكل 26 بيان تجريبي يوضح تيار FN

نقدم شرحا بسيطا للبيان التجريبي الموافق للشكل (26) حيث نلاحظ بيانا صغيرا يمثل تغيرات شدة التيار بدلالة الجهد المطبق بين طرفي مكثفة الموصل لنوعين من أشباه التواقل هما $4H-SiC$ و $6H-SiC$ ، ومن أجل قيم كبيرة للحقل الكهربائي، وجدوا التغير الخطي لـ $\ln(J/E_{ox}^2)$ بدلالة $1/E_{ox}$ مما يفسر وجود آلية فاوئر نوردهايم في هذا المجال من الحقل، ومن خلال البيانيين يتم حساب الميل بالمطابقة مع المعادلة (19) بعدها نقوم بحساب حاجز الكمون ϕ_b .

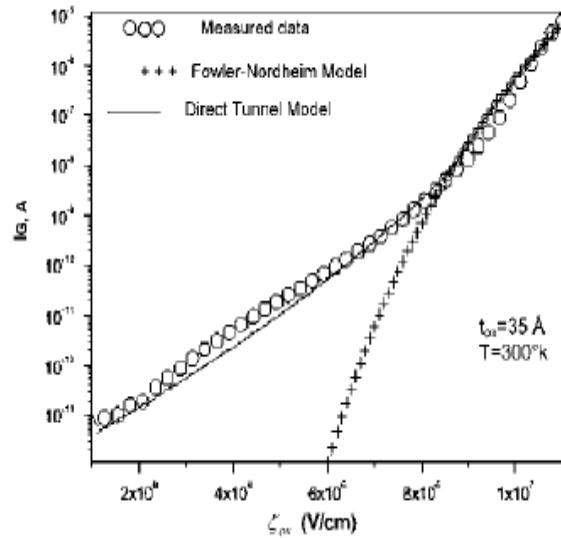
• آلية توصيل النفق (TD) *Mécanisme de conduction Tunnel Direct*:

هذه الظاهرة تكون بارزة في حالة ما إذا كان سمك العازل أقل من $50\text{\AA}$ وكذا شدة الحقل الكهربائي تكون ضعيفة، بحيث يأخذ الحاجز الطاقوي شكلا شبه منحرف (trapezodale, الشكل 16) وتصل طاقة الإلكترون أقل من طاقة الحاجز (شبه ناقل-عازل) (Bentarzi, 2011).

$$J_T = \frac{q^3 m_{sc} E_{ox}}{8\pi h m_{ox} \phi_b \left(1 - \left(1 - \frac{q E_{ox} t_{ox}}{\phi_b}\right)^{1/2}\right)^2} \exp\left(\frac{-4\sqrt{2m_{ox}} \phi_b^{3/2}}{3\hbar q E_{ox}} \left(\phi_b^{3/2} - (\phi_b - q E_{ox} t_{ox})^{3/2}\right)\right) \quad (20)$$

حيث: ϕ_b : حاجز طاقي و t_{ox} : سمك الأكسيد.

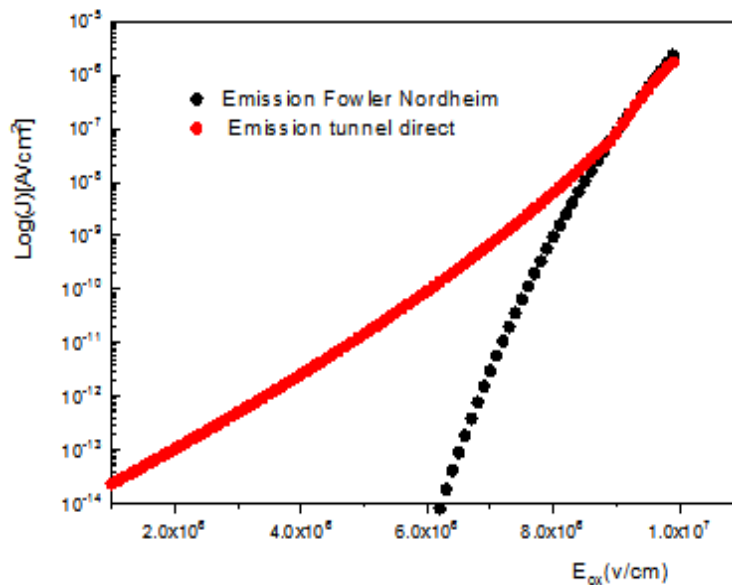
نعرض نتائج تجريبية من خلال بعض المراجع (Bentarzi, 2011) الشكل (27):



شكل 27 نتائج تجريبية لتيار مكثفة (nMOS) بدلالة الجهد المطبق بين طرفيه والمقارنة بين الآليتين :

فاولر نوردهايم و النفق المباشر حيث $T = 300 K$; $tox = 35 \text{ Å}$ (Bentarzi, 2011)

نلاحظ أن آلية تينال المباشر مهيمنة من أجل قيم ضعيفة للحقل الكهربائي في حين تظهر آلية فاولر ونوردهايم من أجل قيم كبيرة للحقل الكهربائي، بعد القيام بالمحاكاة وباستخدام المعادلات رقم (18) (20) توصلنا لنتائج قمنا بعرضها في الشكل (28) وهي موافقة تماما للنتائج المعروضة في الشكل (27) مما يتيح لنا إمكانية استغلال هذه النماذج مرة أخرى إن توفرت لدينا قياسات تجريبية وهذا للتحقق من وجود هاته الظاهرة.



شكل 28 محاكاة لمقارنة بين تيار فاولر - نوردهايم و تيار النفق.

5-الخلاصة (Conclusion):

من خلال هذه الدراسة، وكإجابة على الإشكالية المطروحة في بداية البحث، وبعد مناقشة النتائج المحصلة، توصلنا إلى خلاصة يمكن اختصارها فيما يلي:

إذا توفرت عندنا قياسات تجريبية $I(V)$ بمعنى تيار (كمون) لمكثفة موص معينة فإننا نرسم منحنيات بطريقة معينة بحيث من خلال التيار نتحصل على كثافة التيار وكذا من خلال الكمون نتحصل على شدة الحقل الكهربائي بعدها نقوم على سبيل المثال برسم البيان $\ln(J / E_{ox}^2)$ بدلالة $1 / E_{ox}$ (وهذا في مجال لحقل كهربائي ذي شدة عالية) فإن أعطى هذا الأخير تغير خطي آنذاك نستطيع القول أن آلية فاوئر نوردهايم محققة وبعد استغلال المعادلات السالفة الذكر نستخلص عدة وسائط فيزيائية تخص العازل بعدها نحاول التقليل من التيار الضائع كمثال على ذلك نقوم باختبار عازل ذو سماحية عالية أثناء تصنيع المركب.

6-قائمة المراجع (References):

- Bentarzi. (2011). *Transport in metal-oxide-semiconductor structures:mobile ions effects on the oxide properties*. Springer Science&Business Media.
- Cheng. (1988). Nitridation enhanced conductivity behavior and current transport mechanism in thin thermally nitrided SiO₂. *J. Appl. Phys.*, 797-802.
- Flesischer. (1992). Simplified closed-form trap-assisted tunneling. *j Appl phys*, 5711.
- Flesischer S, L. P. (1993). A new method for extracting the trap energy in insulator. *j Appl phys*, 3348.
- G. Pananakakis et all. (1995). Temperature dependence of the Fowler-Nordheim current in metal-oxide degenerate. *J. Appl. Phys.* 78 (4), 2635-2641.
- Le-Huu. (2011). Investigation of the reliability of 4H-SiC MOS devices for high temperature applications. *Microelectronics Reliab*, 1346-50.
- Mathieu. (2009). *Physique des semiconducteurs et des composants Electroniques cours et exercices corrigés*. Dunod.
- Neamen. (2003). *Semiconductor physics and devices Basic principales*. New york America: McGrawHill.
- Neamen, D. (2003). *Semiconductor physics and devices Basic principales*. New york America: McGrawHill.
- Nicollian, E., & Brews, j. (1982). *MOS(Metal oxide semiconductor)physics and technology*. New jersey: Bell laboratories.
- Nordheim., R. F. (1928). Electron in intense electric Field. . *Proceedings of the Royal Society of london*, 173-181.
- Pierret Robert, F. M. (1996). *Semiconductor devices fundamentals*. Pearson Education India.
- R.Perera, A. I. (2003). Trap assisted leakage current conduction in thin silicon oxynitride _lms grown by rapid thermal oxidation combined microwave excited plasma nitridation. *Microelectronic Eng*, 357-370.
- Sun, M. L. (s.d.). *Solution of the poisson-Boltzmann Equation for MOS capacitors and MOSFETs*. Récupéré sur <http://nanohub.org/ressources/5338>
- Sze, M. (2007). *Physics of semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken.
- Waters (2000). Temperature-dependent tunneling through thermally grown SiO₂ on n-type 4H-. *Appl. Phys. Lett* .SiC and 6H-SiC 1041-1039.