المجلد 6، العدد 1، 2013. ص ص. 33-46

المجلة الأردنية للفيزياء

ARTICLE

تأثير جسيمات ألفا في الخصائص الكهربائية لنبائط MIS: Au-Ta_2O_5-GaAs

سعيد حسن سعيد النعيمي[1]، أطياف صبحي الروّاس[2] و صهباء محفوظ بك العباسي[3]

1- قسم الفيزياء، كلية التربية، جامعة الموصل، الموصل، العراق.
2- قسم العلوم الأساسية، كلية طب الأسنان، جامعة الموصل، الموصل، العراق.
3- معهد إعداد المعلمات، مديرية تربية نينوى، نينوى، العراق.

Received on: 16/5/ 2012; *Accepted on: 27/1/ 2013*

الملخص: يهدف البحث إلى دراسة تأثير جسيمات ألفا في الخصائص الكهربائية لنبائط (MIS:(Au-Ta_2O_5-GaAs، وكذلك تأثيرها في آلية نقل التيار الكهربائي وكيفية تغيره مع طاقة جسيمات ألفا ومع زمن التشعيع. فقد تم تحضير هذه النبائط بترسيب طبقة من الذهب سمكها 1000 Å بطريقة التبخير الحراري وتحت ضغط واطئ يقرب من 10^{-5} torr لتكوين البوابة الفوقية لتركيب MIS. وقد شععت النبائط المحضرة بجسيمات ألفا من مصدر راديوم ^{226}Ra فعاليته 0.5 µCi بمدى طاقات (5.1-1.2) MeV لأزمان تشعيع مختلفة ضمن مدى (0-30) دقيقة في درجة حرارة الغرفة وبزاوية صلدة صغيرة لضمان سقوط الجسيمات بشكل عمودي على النبيطة، حيث تم توهين الطاقة القصوى 5.1 MeV إلى طاقات أقل هي (1.2، 1.8، 3، 4) MeV باستعمال رقائق بوليمرية ثبتت أمام الجسيمات. ولمعرفة كيفية فقدان جسيمات ألفا لطاقتها ومدى التلف الحاصل في النبيطة والنقطة التي يحدث عندها أعظم فقدان للطاقة في النبيطة، فقد تم حساب معدل الفقدان في طاقة ألفا وكذلك تحديد مدى الجسيمات في الطبقات الثلاث المكونة للنبيطة المحضرة في كل من الذهب (Au) وأوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5) وأرسينايد الكاليوم (GaAs). أظهرت النتائج وجود تأثير لجسيمات ألفا في الخصائص الكهربائية للنبيطة، وأن هذا التأثير يختلف باختلاف طاقة الجسيمات وزمن التشعيع، وأن نمط التغير لا يكون واحدًا بل يكون مختلفاً من طاقة إلى أخرى وزمن تشعيع إلى آخر. كذلك أظهرت خصائص (تيار- فولتية) أن آلية نقل التيار هي شوتكي في أكثر الحالات للنبائط المشععة وبول- فرينكل في بعض الحالات. إن خصائص (تيار- فولتية) عند التشعيع أوضحت حدوث تأثير دائم في الخواص الكهربائية لطاقتي التشعيع (1.2، 5.1) MeV ناتج من حصول تلف دائم في مادة النبيطة، وحدوث تأثير وقتي عند الطاقة 4 MeV، في حين أن الطاقتين (1.8، 3) MeV لم تحدثا تأثيرًا ملحوظاً في خصائص النبيطة.

Effect of Alpha Particles on the Electrical Characteristics of the MIS: Au-Ta_2O_5-GaAs Devices

S. H.S. Alnia'emi[a], A.S. Al-Rawass[b] and S.M.B Al-Abasee[c]
a- Physics Department, College of Education, Mosul University, Mosul, Iraq.
b- Basic Sciences Department, Faculty of Dentistry, Mosul University, Mosul, Iraq.
c- Teacher Preparation Institute, Directorate of Education in Nineveh, Nineveh, Iraq.

Abstract: The paper aims to study the effect of alpha particles on the electrical properties of MIS:Au-Ta_2O_5-GaAs devices and on the electrical current transition mechanism. The devices are prepared by deposing a layer of gold with a thickness of 1000 Å by using the thermal evaporation method under a pressure of 10^{-5} torr to form the upper gate of the MIS construction. The prepared devices are irradiated with alpha particles from a ^{226}Ra source (0.5 µCi). The irradiation is performed under room temperature with alpha energies of (1.2, 1.8, 3, 4, 5.1) MeV for different

Corresponding Author: S. H.S. Alnia'emi **Email**: saeed_alnaeme@yahoo.com

times of (0-30) min. The irradiation solid angle was small to maintain the alpha particles normally incident on the devices. The maximum energy (5.1 MeV) of the alpha particles is attenuated to lesser energies by situating polymer sheets with different thicknesses in front of the incident particles. The energy loss and the range of alpha particles within the layers of the device; the gold (Au), the tantalum oxide(Ta_2O_5) and the gallium arsenide(GaAs), are calculated to determine the way of losing the alpha particles of their energies, the amount of the produced damage and the point where the maximum energy loss is taking place within the device. The irradiation showed an effect on the electrical properties of the device, and this effect is found to be varied with the particles energy and the irradiation time. The I-V characteristics showed that the current transition mechanism is Shottky for most of the cases of irradiation and Poole-Frenkel for some cases. These characteristics also showed a permanent damage in the device at energies of (1.2 and 5.1) MeV, and a temporary effect at energies of 4 MeV, while there was no significant effect at energies of (1.8 and 3) MeV.

المقدمة

تكمن أهمية دراسة الخصائص الكهربائية لنبيطة MIS المشععة في معرفة تأثير الإشعاع المؤين لغرض تصنيع نبائط قابلة للاستعمال في التطبيقات التكنولوجية تحت الظروف البيئية المختلفة. إن تركيب معدن- أوكسيد– شبه موصل (Metal–oxide–semiconductor) (MOS or MIS) له أهمية كبيرة في دراسة العديد من النبائط مثل ترانزستور تأثير المجال ذي البوابة المعزولة (Insulated gate field effect transistor) IGFET الذي يُعد العمود الفقري في الدوائر الإلكترونية المتكاملة ذات المقياس العالي جداً (Very Large Scale Integration) (VLSI) [1].

تعد الطبقة البينية لتركيب نبيطة MIS، المتمثلة في طبقة أوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5) في بحثنا هذا، من أكثر الأجزاء حساسية للإشعاع، حيث يمتاز أوكسيد التنتاليوم عن غيره من الأكاسيد المعروفة مثل SiO_2 وAl_2O_3 بأنه يمتلك تيار تسرب سطحي واطئًا، وثابت عزل عاليًا مما يعطي سعة عالية لوحدة المساحة [1، 2، 3، 4]. فضلاً عن ذلك، فإن Ta_2O_5 يمتلك مقاومية واطئة، وكذلك كثافة حالات واطئة. كما أن فقد العازل له واطئ أيضاً، وأن المعامل الحراري للسعة يكون هو الآخر واطئاً جداً [4، 5]. كل هذه المزايا جعلت الأوكسيد Ta_2O_5 مهمًا في العديد من التطبيقات مثل متسعات دائرة المعالجة العشوائية الحركية (Dynamic Random Access Memory) (DRAM capacitors)، ونبائط البوابة متعددة الطبقات (Multilayer gate)، ونبائط دليل الموجة (Optical wave guide devices)، والمرشحات البصرية (Optical sensors) [3، 5، 6، 7، 8]، حيث يستخدم العازل بهذه المزايا في تطبيقات البوابة العازلة (gate dielectric applications) ولاسيما عند جرع الإشعاع المنخفضة لأشعة جاما [9].

من المعروف أن الإشعاعات المؤينة بنوعيها الجسيمية مثل البروتونات وجسيمات ألفا وجسيمات بيتا والأيونات الأخرى، والكهرومغناطيسية مثل أشعة جاما والأشعة السينية والموجات فوق البنفسجية، تؤثر في خصائص النبائط وتغير من مواصفاتها. وتختلف تأثير الإشعاعات وطريقة تفاعلها مع النبائط باختلاف المواد المكونة لطبقات تلك النبائط.

تعتمد الجسيمات المشحونة في تفاعلها مع المادة على مبدأ التفاعل (المجال) الكولومي (Coulomb interaction). فالجسيمات المشحونة الثقيلة تفقد طاقتها ببطء وبالتدريج عند مرورها في وسط ما من خلال تفاعلها مع ذرات المادة، مما يؤدي إلى إحداث تأينات وتهيجات لذرات الوسط، قد تؤدي بدورها إلى تحطيم الأواصر التي تربط جزيئات ذلك الوسط. وجدير بالذكر أن الجسيمات الثقيلة (التي هي أثقل من الإلكترونات) مثل جسيمات ألفا لا تنحرف كثيراً عن مسارها داخل المادة وتكوِّن مساراً خطياً، ونظرًا لأنها تمتلك شحنة مقدارها (2e) فإنها تُحدِث مساراً كثيفاً من التأينات مكونة أزواجًا من الأيونات وبذلك تفقد طاقتها على مسافة قصيرة داخل المادة [10].

بشكل عام، فإن الجسيمات المشحونة تفقد طاقتها بصورة رئيسة عن طريق سلسلة من التفاعلات الكولومية مع الإلكترونات الذرية أو نوى الذرات في المادة المعترضة؛ إذ تُحدِث الجسيمات المشحونة عدداً كبيراً من التصادمات مع ذرات المادة، وتكون الطاقة المفقودة في التصادم الواحد قليلة فيبدو الجسيم المشحون وكأنه يخسر طاقته بشكل مستمر ويتعرض لإبطاء تدريجي. وعليه، يستخدم المعدل الوسطي للطاقة المفقودة (Mean Rate Energy Loss) في وحدة المسافة من المسار (dE/dx) للتعبير عما يخسره الجسيم المشحون من طاقة في الوسط، وهذا ما يُعرف بقدرة الإيقاف (Stopping power) للمادة [11] .

إن الجسيم المشحون الذي يجتاز مادة ما سوف يسلك مساراً متصلاً ويفقد طاقته على طول هذا المسار ويتوقف عندما يفقد كل طاقته، والمسافة التي يقطعها الجسيم قبل توقفه تعرف بطول المسار أو المدى (Range). وتعتمد المسافة التي تقطعها الجسيمات في الوسط على طبيعة المادة المعترضة وعلى طاقتها الحركية التي تستنفد تماماً عند وصولها نهاية المدى، فضلاً عن طاقتها الابتدائية؛ إذ إن مدى جسيمات ألفا لا يتجاوز بضعة سنتمترات في الهواء.

إن جسيمات ألفا والبروتونات هي جسيمات مشحونة، وتُعد ثقيلة مقارنة بالإلكترونات، وهي تتفاعل مع ذرات المادة إما بتفاعلها مع الإلكترونات المدارية أو مع النوى المكونة لتلك الذرات. فجسيمات ألفا تحدث تلفاً موقعيًا في المادة من خلال تأيين الذرات وتهييجها على طول مسارها لدى مرورها بالمادة إن لم تكن طاقتها عالية نسبيًا. ويمكن لجسيمات ألفا أن تدخل في تفاعلات نووية مع نوى ذرات المادة إذا كانت طاقتها عالية نسبيًا معتمدة على طاقة التفاعل، وحاجز الطاقة (طاقة العتبة للتفاعل). عموماً، فالتفاعلات النووية التي قد تحصل في عمليات تشعيع المادة بالبروتونات أو جسيمات ألفا (طاقتها عالية نسبياً بحدود عشرات المليون إلكترون فولت) هي على الأغلب من نوع (P, n)، (P, γ)، (α, P)، (α, n)، (α, γ)، (P, Pn) وتفاعلات أخرى [12].

ومهما يكن، فإن تأثيرات الإشعاع تختلف باختلاف نوع الجسيمات الساقطة وطاقتها، ونوع المادة المعترضة وتركيبها [13]، فضلاً عن كتلة الأشعة الجسيمية وشحنتها. ففي دراستنا هذه، سنركز على تأثير الأشعة الجسيمية الثقيلة، وهي جسيمات ألفا في نبائط MOS؛ إذ يهدف البحث إلى معرفة تأثيرات جسيمات ألفا المؤينة بطاقات مختلفة لأزمان تشعيع مختلفة، في الخصائص الكهربائية للنبيطة MIS (Au-Ta_2O_5-n/GaAs) عند درجة حرارة الغرفة، وكذلك تحديد تأثير تلك الجسيمات في آلية نقل التيار في النبيطة ومدى تغيرها مع زمن التشعيع وتغيرها مع طاقة جسيمات ألفا.

الجانب العملي

تبدأ عملية تحضير النبيطة بتنظيف الشريحة (Substrate cleaning)، وهي أرسينايد الكاليوم (GaAs)، لإزالة الملوثات العضوية واللاعضوية باستخدام المحلول الكيميائي العياري من تراي كلوروإثيلين (TCE)، والأسيتون، وإيزوبروبانول الكحول (IPA) لمدة خمس دقائق لكل مرحلة على التتابع، ثم يتبع ذلك غمر الأرضية بالماء اللاأيوني (D.I. water) لمدة دقيقتين على الأقل للتخلص من الأوكسيد المتكون تلقائياً (native oxide) على السطح الخلفي لطبقة GaAs التي يقرب سمكها من $(20–30)x10^{-4}$ μm. تُغمر الأرضية في محلول الإزالة الكيميائي (chemical etching solution) ذي النسبة الحجمية $HCl:H_2O_2:H_2O$ 3:1:150 ml ويستمر تحريكها لمدة 15 ثانية، بعدئذٍ تُرفع الأرضية من المحلول وتُغمر في الماء اللاأيوني المغلي لإزالة الأيونات العالقة على السطح.

أما أوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5) العازل فقد تم ترسيبه على أرضية شبه الموصل n-GaAs بطريقة الرشق، ثم أُجريت عملية التماس الأومي (Ohmic contact) على السطح الخلفي لشبه الموصل، وذلك بترسيب 300 mg من معدن الذهب Au ذي نقاوة عالية (99.99%) بطريقة التبخير الحراري Thermal evaporation تحت ضغط يقرب من 10^{-5} torr، وبعدها تُلَدن العينة تحت ضغط 10^{-3} torr في درجة حرارة 400 °C لمدة 30 دقيقة. بعد إنجاز هذه العملية تُرَسب طبقة رقيقة من الذهب (Au) بسمك 1000 Å على شكل نقط دائرية صغيرة مساحة كل منها $7.85x10^{-3}$ cm^2 باستخدام قناع معدني وبطريقة التبخير الحراري تحت ضغط 10^{-5} torr، وتدعى هذه العملية المعدنة Metallization. قُطّعت النبيطة المُصنعة إلى عدد من النبائط وثُبّتتْ على قواعد من نوع To -5 header بمعجون الفضة وتُركت لمدة 48 ساعة كي تجف، تلتها عملية توصيل أقطاب الذهب المرسبة بأسلاك رفيعة بتقنية الضغط الحراري (Thermo-compression bonding process).

إن النبائط MIS: Au-Ta_2O_5-GaAs التي حُضِّرت مختبرياً كان سمك طبقاتها تقريبًا كما يلي: الذهب Au(0.1μm)، وأوكسيد التنتاليوم Ta_2O_5(0.05μm)، وأرسينايد الكاليوم GaAs(450μm). وجدير بالذكر أن سمك الطبقات المرسبة تم قياسها باستعمال جهاز Bigdag باستخدام الليزر. اختيرت طاقات محددة وهي (1.2، 1.8، 3، 4، 5.1) MeV لجسيمات ألفا من مصدر الراديوم Ra^{226} لتشعيع هذه النبائط بدءاً من معدل الطاقة القصوى التي حُسِبت باستخدام محلل متعدد القنوات (Multi-channel Analyzer) وكانت 5.1 MeV ومتوسط مداه في الهواء بحدود 3.7 cm؛ إذ تم الحصول على طاقات أقل من الطاقة القصوى.

وقد تم ذلك باستخدام مُوهنات للطاقة على شكل رقائق بوليميرية من نوع PMMA وPS بسماكات مختلفة ثُبِّتت أمام مصدر الراديوم المشع، وقد تمت معايرة تلك الرقائق البوليمرية طاقياً باستخدام مصدر مشع قياسي هو الأمريشيوم ^{241}Am فاعليته 0.5 µCi.

أجريت القياسات في البحث باستخدام منظومة التبريد، وهي الكرايوستات (Cryostat)؛ إذ أُجريت عملية القياس بعد مرور نصف ساعة على عملية التفريغ للإبقاء على الضغط المنخفض داخل الكرايوستات الذي كان بحدود 10^{-3} torr. رُبِطت دائرة تيار- فولتية (I–V) وحُدِّدت الفولتية القصوى فضلاً عن مستوى التغير في الفولتية، وزمن دوام (استمرار) الفولتية المُجهّزة من مولد الفولتية المتدرجة (ramp voltage generator) بشكل متدرج سُلِّمي في أزمنة متساوية؛ إذ قيس التيار بوصفه دالة للفولتية بالانحيازين الأمامي والعكسي (forward and reverse bias). وجدير بالذكر أن منظومة التبريد، ومولد الفولتية المتدرجة تم تصميمهما محلياً من جانبنا في المختبر.

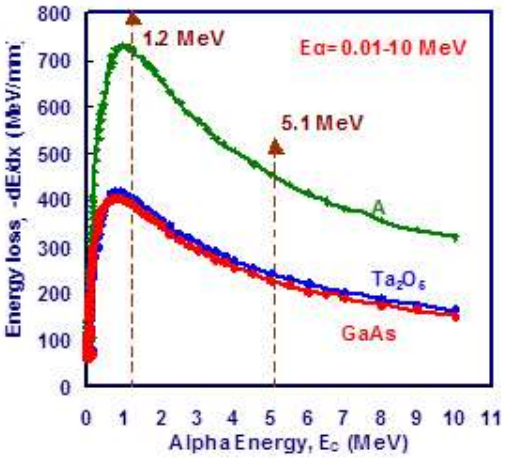
ومن أجل دراسة تأثير الجسيمات المشحونة في الخصائص الكهربائية لنبيطة ما، ولمعرفة التأثيرات الحقيقية التي تحدثها تلك الجسيمات، وكذلك معرفة التغيرات الحاصلة في النبيطة وفي السطح البيني لشبه الموصل-العازل، فلابد من دراسة أولية لمعدل الفقدان في طاقة تلك الجسيمات خلال مرورها في النبيطة، وحساب مدى الجسيمات في الطبقات المكونة للنبيطة. وهذه الدراسة تفيد في معرفة العمق الذي تخترقه تلك الجسيمات لتحديد مقدار التلف الذي تحدثه جسيمات ألفا، وذلك للتمكن من تحديد الطبقة والنقطة التي عندها يحصل تلف موضعي كبير ويحصل أعظم فقدان للطاقة من خلال حسابات طاقة جسيمات ألفا النافذة من طبقات النبيطة المختلفة. ومن خلالها يمكن مسبقًا تحديد النقطة المراد حصول أكبر فقدان للطاقة عندها والطبقة المراد حصول أكبر تأثير موقعي للجسيمات في النبيطة عندها قبل دراستها. لذا يتم حساب معدل الفقدان الخطي في طاقة الجسيمات المشحونة لوحدة المسار $(-dE/dx)$في الطبقات المكونة للنبيطة أو قدرة الإيقاف لتلك الطبقات لجسيمات ألفا ومدى اختراقها، وذلك باستخدام البرنامج الحاسوبي SRIM-2003 (The Stopping Power and Range of Ions in Matter) [14]. وعليه، فقد حُسِبت الطاقات النافذة من كل طبقة تبعًا للطاقة الأولية لجسيمات ألفا الساقطة على النبيطة، وكذلك حُسِب مقدار الفقدان في طاقة جسيمات ألفا لوحدة المسار $(-dE/dx)$، أو ما يسمى قدرة الإيقاف للمادة، في الطبقات الثلاث للنبيطة: Au، وTa_2O_5، وGaAs.

إن هذه الحسابات مهمة وتُعدّ مدخلاً ضرورياً، في بحوث لاحقة، لدراسة التأثيرات الإشعاعية لجسيمات ألفا المؤينة بجرعات وطاقات مختلفة في الخصائص الكهربائية للنبيطة المحضرة، وعلاقة طاقة الجسيمات بتلك الخصائص، فضلاً عن حساب معلمات أخرى وعلاقتها بطاقات ألفا ومدى تأثير الإشعاع في استقرارية النبيطة MIS.

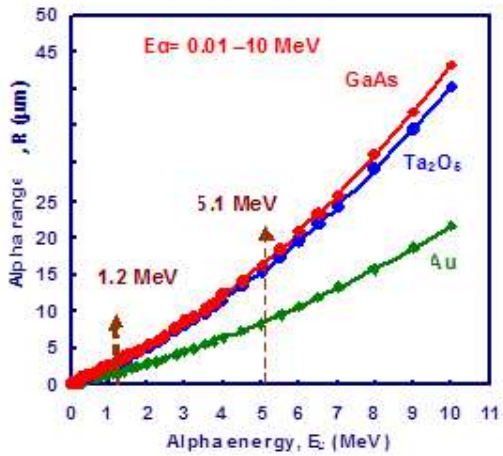
النتائج والمناقشة

الشكل (1) يبين علاقة معدل فقدان الطاقة لوحدة المسار(-dE/dx) مع طاقة جسيمات ألفا في الطبقات الثلاث المكونة للنبيطة MIS: (Au-Ta_2O_5-GaAs)؛ إذ يظهر من الشكل أن فقدان الطاقة يتم بالنمط نفسه في المواد الثلاث مع الاختلاف في قيم الفقدان. وقد وُجِد أن أقصى فقدان في طاقة ألفا يحدث عند الطاقة 1 MeV~ تقريباً للنبيطة المستخدمة، وعندها يحصل أكبر تلف في المادة. إن كمية الجذور الحرة المتكونة تكون أكبر ما يمكن عند هذه الطاقة مع الاختلاف في نوع المادة، ويقل مقدار الفقدان في الطاقة مع زيادة طاقة الجسيمات أكثر من 1 MeV، كما يكون مقدار النقصان في الطاقة المفقودة أبطأ منه في الحالة التي تكون فيها طاقة الجسيمات أقل من 1 MeV .

ويلاحظ من الشكل نفسه أن معدل الفقدان في طاقة جسيمات ألفا في مادتي GaAs وTa_2O_5 متقارب نوعًا ما، في حين يصل إلى مثلي قيمته في مادة الذهب، لأن كثافة هاتين المادتين متقاربة، وأن قيمهما بحدود $8.54g/cm^3$, $5.81g/cm^3$ على الترتيب، في حين أن كثافة الذهب هي بحدود $19.311\ g/cm^3$، وهي أكبر (3–2) مرات تقريباً من كثافة المادتين السابقتين. وبما أن معدل الفقدان يعتمد على الكثافة ويتناسب معها طردياً، فإننا نجد أن مقدار الفقدان في طاقة ألفا في مادة الذهب أكبر بحدود الضعف مقارنة بمقدار فقدانها في مادتي GaAs وTa_2O_5 علمًا بأن مدى الجسيمات يتناسب عكسياً مع معدل الفقدان في الطاقة.



الشكل (1): علاقة معدل فقدان الطاقة لجسيمات ألفا مع الطاقة



الشكل (2): علاقة مدى جسيمات ألفا مع الطاقة

ولتوضيح العلاقة بين مدى جسيمات ألفا وطاقتها، نجد من الشكل (2) أن هناك تغيراً أسياً واضحاً ومتقارباً جداً لمادتي GaAs وTa_2O_5؛ في حين أن هذا التغير يقل إلى النصف تقريباً في مادة Au. وكما ذكرنا سابقاً، فإنه بزيادة كثافة المادة تزداد قدرة إيقاف المادة (dE/dx) فيقل من ثم اختراق الجسيم للمادة وبذلك يقل مداه فيها.

بشكل عام، نجد أن مدى جسيمات ألفا في المواد يتناسب تناسبًا طرديًا بشكل أسي مع طاقة الجسيمات الساقطة، وأنه يرتبط ارتباطًا وثيقًا بقدرة إيقاف المادة التي بدورها ترتبط بكثافة المادة، وعددها الكتلي، وطاقة الجسيمات.

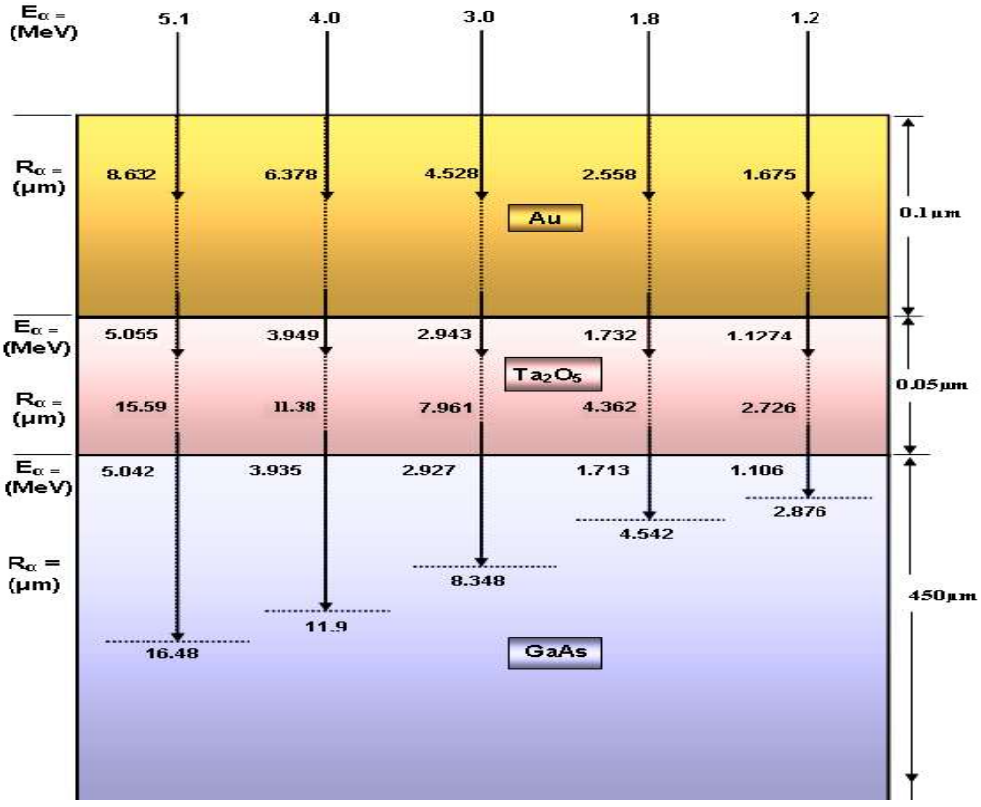
كيفية فقدان الطاقة في نبيطة MIS

لمعرفة مقدار الفقدان في طاقة جسيمات ألفا ومداها في المواد المكونة للنبيطة MIS (Au-Ta_2O_5-GaAs)، فقد حُسِب مقدار الطاقة المفقودة ومدى هذه الجسيمات واختراقها لطبقات النبيطة الثلاث من البرنامج النظري (SRIM) [14] كما هو موضح في الجدول (1) والشكل (3) لكل من طاقات ألفا (1.2، 1.8، 3.0، 4.0، 5.1) MeV. ومن حساب مقدار الطاقة المفقودة في كل جزء في النبيطة والمسافة التي يقطعها الجسيم، نجد أن تشعيع النبيطة بجسيمات ألفا بالطاقات أعلاه يُحدث فقداناً في الطاقة $-dE$ تبعًا لسمك تلك المادة dx. ويلاحظ بشكل عام أن مقدار الطاقة المفقودة من الجسيم والمترسبة في المادة يعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة ونوع الوسط وتركيبه وسمكه [13].

إن مقدار الطاقة المترسبة في المادة يزداد بزيادة طاقة جسيمات ألفا، ويكون مداها صغيراً داخل المادة. وعليه، فإن مقدار الطاقة المترسبة في الذهب (Au) يكون أكثر مما هو عليه في أوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5)، لأن كثافة الذهب أكثر من كثافة الأوكسيد، وأن سمك الذهب المرسب أكثر من سمك الأوكسيد. وهكذا تستمر جسيمات ألفا بفقدان طاقتها واختراقها للمادة بمدى معين لحين وصولها إلى الطبقة الثالثة وهي أرسينايد الكاليوم (GaAs) علمًا بأن جسيمات ألفا ستفقد جميع طاقتها وتتوقف بسبب السمك الكبير لهذه المادة. وعليه، فإن جسيمات ألفا بالطاقات المستخدمة كلها ستخترق مادتي الذهب والأوكسيد بفقد طاقي قليل فيهما، واصلة إلى طبقة أرسينايد الكاليوم. ومن الجدير بالذكر أن الطاقة الخارجة من طبقة Au تعد طاقة تشعيع أولية لطبقة Ta_2O_5، وبدورها تصبح الطاقة الخارجة منها طاقة تشعيع أولية لطبقة GaAs، آخذين بعين الاعتبار مقدار الطاقة المفقودة (أو المترسبة) في المادة في كل حالة تشعيع من خلال معرفة معدل الطاقة المفقودة والسمك الذي اخترقته تلك الجسيمات.

الجدول (1): الطاقات الساقطة والمترسبة والنافذة ومعدل الفقدان لجسيمات ألفا في نبيطة MIS: Au-Ta_2O_5-GaAs

MIS Layer	Incident energy E_α (MeV)	Average energy loss dE_α/dx (MeV/mm)	Range R_α (μm)	Deposited energy E_a (MeV)	Transmitted energy E_t (MeV)
Au (0.1μm)	5.1	450.525	8.632	0.045	5.055
	4.0	504.4	6.378	0.0504	3.9496
	3.0	570	4.528	0.057	2.943
	1.8	676	2.558	0.0676	1.732
	1.2	725.9	1.675	0.0726	1.1274
Ta_2O_5 (0.05μm)	5.055	243.641	15.596	0.0122	5.0428
	3.9496	274.604	11.385	0.0137	3.9359
	2.943	312.132	7.961	0.0156	2.9274
	1.732	375.628	4.362	0.0188	1.7132
	1.1274	411.725	2.726	0.0206	1.1068
GaAs (450μm)	5.0428	229.463	16.485	5.0428	----
	3.9359	260.47	11.989	3.9359	----
	2.9274	298.644	8.348	2.9274	----
	1.7132	362.4	4.542	1.7132	----
	1.1068	397.665	2.872	1.1068	----



الشكل (3): مخطط الطاقات الساقطة والمترسبة والنافذة ومعدل الفقدان لجسيمات ألفا في نبيطة MIS: Au-Ta_2O_5-GaAs

وكما يلاحظ من الجدول (1) وكذلك من الشكل (3)، فإن معدل فقدان الطاقة في طبقة GaAs مساوٍ تقريباً لمعدل الفقدان في طبقة الأوكسيد Ta_2O_5. ولأن السمك المستخدم لهذه المادة كبير (بحدود 450μm) وهو أكبر بكثير من مدى جسيمات ألفا بالطاقات المستخدمة في مادة GaAs، فإن جسيمات ألفا تفقد كل طاقتها في هذه المادة.

وعليه، يمكن القول إن جسيمات ألفا تؤثر بشكل كبير في شبه الموصل أرسينايد الكاليوم GaAs مقارنة بمادتي الذهب Au والأوكسيد Ta_2O_5، وتُحدِثُ تلفاً خلال مسارها في هذه المادة وتؤدي إلى تكوين حاملات شحنة إضافية بسبب تكسر الأواصر في هذه المنطقة بفعل الإشعاع [15].

ومهما يكن، فإن جسيمات ألفا تفقد جزءاً بسيطًا جدًا من طاقتها في طبقتي الذهب (Au) وأوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5)، بينما يفقد الجزء الأكبر من طاقتها (بحدود 95%) في طبقة أرسينايد الكاليوم (GaAs) عند مسافة من السطح البيني لطبقتي Ta_2O_5-GaAs تبعًا لطاقة ألفا الساقطة على النبيطة. فطاقة الجسيمات الساقطة على النبيطة تُفقَدُ عند مسافة أقرب من السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs بنقصان طاقتها، حيث نجد أن طاقة جسيمات ألفا البالغة 5.1 MeV تُفقد على مسافة 16.485 µm من السطح البيني في طبقة أرسينايد الكاليوم، بينما نجد أن الطاقة 1.2 MeV للجسيمات تُفقَدُ عند مسافة أقرب إلى السطح البيني في حدود 2.872 µm.

ومن الجدير بالذكر أن الطاقة 1.2 MeV هي قريبة جداً من النقطة أو الذروة (peak) التي يحصل عندها أعظم فقدان لطاقة ألفا في المادة (أي أعظم تَرسُّب للطاقة في المادة)، وهي بحدود 1 MeV~ كما هو موضح في الشكل (1)، فضلاً عن أن معظم هذه الطاقة يُفقَد على مسافة قريبة من السطح البيني في طبقة أرسينايد الكاليوم، لذا يُتوقَّعُ حصول ضرر كبير وظهور تأثير كبير للإشعاع في النبيطة عند هذه الطاقة.

ويجب التذكير هنا بأننا لا ندرس تأثير جسيمات ألفا في طبقة محددة من طبقات النبيطة، بل نحاول دراسة التأثير النهائي لجسيمات ألفا في الخصائص الكهربائية للنبيطة نتيجة فقدان جسيمات ألفا لطاقتها في طبقات النبيطة الثلاث Au-Ta_2O_5-GaAs، والمتمثلة بالطاقات الساقطة على النبيطة وهي (1.2، 1.8، 3.0، 4.0، 5.1) MeV.

خصائص تيار- فولتية (I-V)

الأشكال (4a-e) توضح خصائص تيار- فولتية **(I-V)** للنبائط المشعة بطاقات ألفا (1.2-5.1) MeV لأزمان تشعيع مختلفة في درجة حرارة الغرفة. يوضح الشكل (4a) العلاقة بين التيار وفولتية الانحياز المسلّطة للنبيطة المشعّة بطاقة 5.1 MeV بأزمان تشعيع مختلفة في درجة حرارة الغرفة. ويتبين أن التيار يزداد بشكل تدريجي حتى زمن تشعيع مقداره (9-15) دقيقة، ثم يزداد بشكل كبير بعد هذا الزمن ولاسيما عند منطقة الفولتيات المنخفضة الأقل من 0.6 V وصولاً إلى الزمن 22 دقيقة، وعندها يصل التيار إلى أقصى قيمة له لا يزداد بعدها مع زيادة زمن التشعيع. ويعتقد أن الزيادة في قيمة التيار يعود سببها إلى زيادة زمن التشعيع أو التعريض التي تؤدي إلى زيادة تراكم الطاقة المترسبة في النبيطة من جسيمات ألفا القاصفة التي قد تُولدُ مستوياتٍ بينية جديدة في السطح البيني لـ شبه موصل-عازل [16]. إن هذه المستويات البينية تُحدِثُ بدورها فيضاً في حاملات الشحنة عند السطح البيني [17]، لذا يلاحظ أن أقصى قيمة يصلها التيار عندما يكون زمن التشعيع بحدود 22 دقيقة للطاقة 5.1 MeV. ويلاحظ من الشكل نفسه أن خواص النبيطة المشعة بعد يوم واحد من القياس تصبح مستقرة تقريباً، مما يعني حدوث تلف دائم (Permanent) في النبيطة.

أما خصائص تيار– فولتية (I-V) بالاتجاه العكسي، فإن هناك زيادة قليلة في التيار عند أزمان التشعيع المنخفضة (0-12) دقيقة، في حين أن هناك زيادة كبيرة في التيار عند الأزمان (12-22) دقيقة وهذا قد يعزى إلى زيادة تيارات التسرب السطحي المتولدة نتيجة الإشعاع.

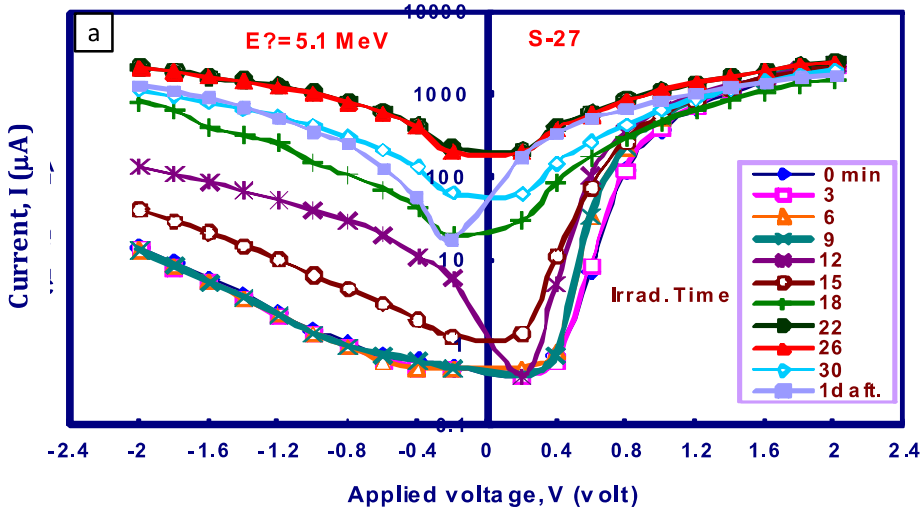
وللتشعيع بطاقة 4 MeV نجد من الشكل (4 b) أن التغير في التيار لفولتية الانحياز الأمامي لقيمة أقل من 1 V يبدأ بعد زمن 6 دقائق، ويزداد بشكل ملحوظ إلى حد 22 دقيقة مقارنة بالنبيطة غير المشعة بحيث تكون قيم التيار مطابقة نوعاً ما لهذه الأزمان من التشعيع، كما نجد أن أقصى زيادة في قيمة التيار تحصل عند الزمن 12 دقيقة مقارنة بالنبيطة غير المشعة. أما لأزمان التشعيع الأعلى من 22 دقيقة ولفولتية أقل من 1 V، فإنه يلاحظ حدوث نقصان قليل في التيار مقارنة بتيار النبيطة غير المشعة وأحياناً يكون منطبقاً معه؛ أي حصول تقويم جيد للتيار عند زيادة زمن التشعيع. هذا السلوك في زيادة التيار قد يعزى إلى أن الإشعاع المؤين يعمل على تكوين أزواج إلكترون– فجوة في العازل فضلاً عن توليده حاملات الشحنة في السطح البيني لشبه موصل-عازل [13، 18، 19] محدثاً زيادة في قيمة التيار؛ إذ إن تكوّن الشحنات المحتثة نتيجة الإشعاع في الأوكسيد و/أو عند السطح البيني لشبه الموصل- أوكسيد يُولد إشارة قابلة للقياس في أثناء تعريض النبيطة إلى الإشعاع مثل أشعة جاما، والنيوترونات، والإلكترونات، وأشعة X- [20] والجسيمات المشحونة، في حين أن النقصان الحاصل في التيار عند أزمان التشعيع

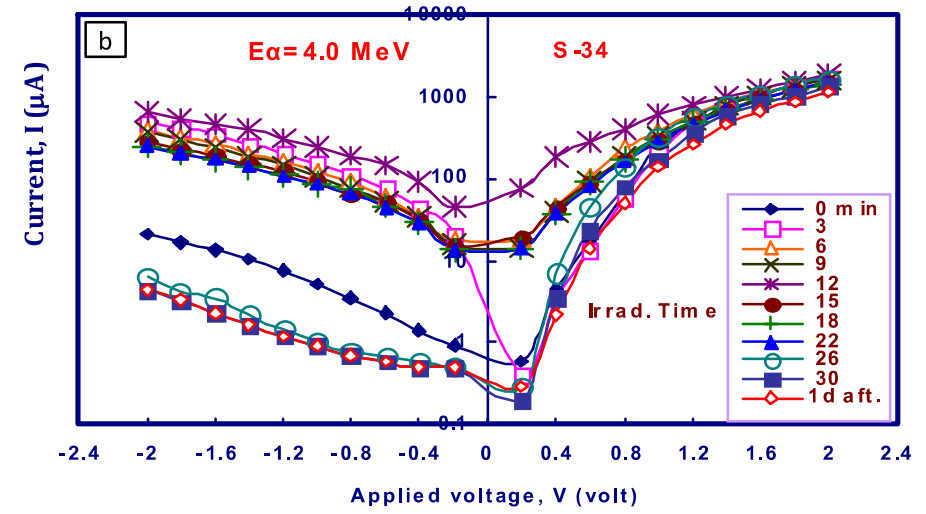
العالية لهذه الطاقة والمذكورة أعلاه يعزى إلى أن تأثير التلف الإشعاعي يمكن أن يُكون مستويات قوانص (traps) تعمل على اقتناص الإلكترونات عند السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs، وهذا يبين عمق القوانص داخل طبقة العازل لأوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5). وعند ترك النبيطة بعد التشعيع لمدة يوم واحد وفحصها ثانية، تقل قيمة التيار عن أقصى زيادة له ولكنه يظلّ أكثر مما هو للنبيطة غير المشعة في الانحياز الأمامي وأقل في الانحياز العكسي؛ أي أن التأثير لم يكن دائماً.

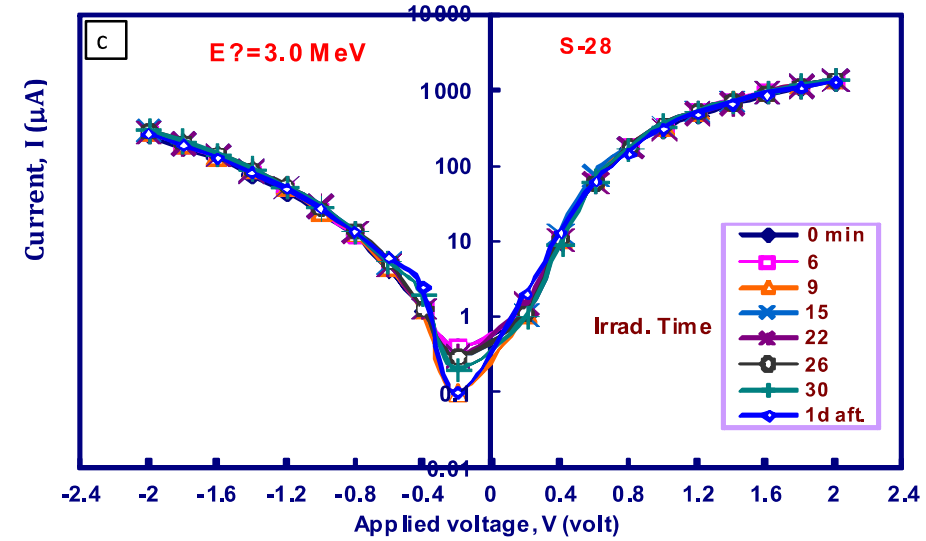
أما الشكلان (4 c,d) فإنهما يوضحان تأثير الطاقتين (1.8، 3.0) MeV في النبيطة MIS قيد الدراسة وباتجاهي الفولتية المسلطة الأمامي والعكسي. فالتيار يزداد أسياً مع زيادة فولتيتي الانحياز الأمامي والعكسي، في حين أن هناك ثبوتاً أو استقراراً واضحين في قيمة التيار مع زيادة الجرعات الإشعاعية للنبائط المشعة مقارنة مع النبيطة غير المشعة؛ إذ تبين عدم وجود تأثير ملحوظ لهاتين الطاقتين في خصائص النبيطة.

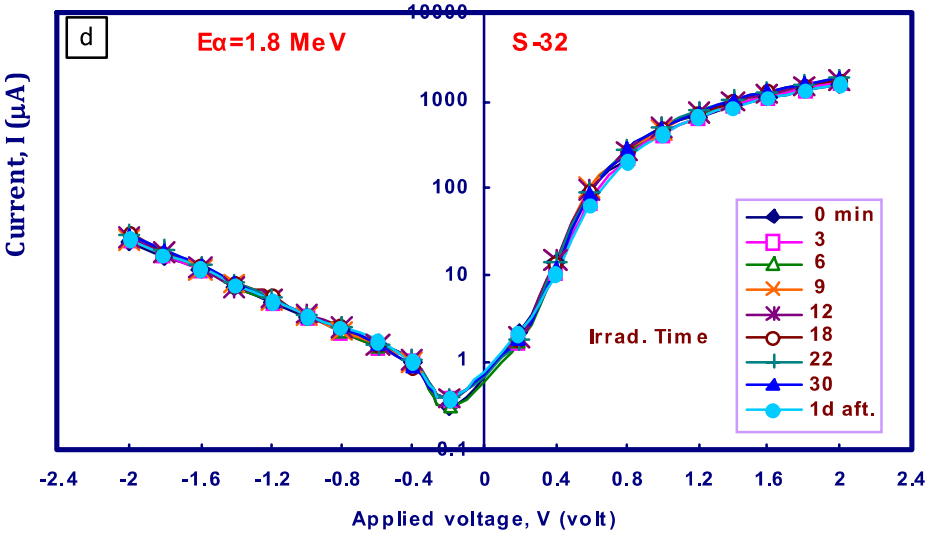
إن السبب الرئيسي في هذا السلوك قد يعزى إلى أن جسيمات ألفا بالطاقتين (1.8، 3.0) MeV تفقد كل طاقتها في المادة عند مسافة أو مدى أقل مقارنة بالطاقتين (4.0، 5.1) MeV، ولكن الطاقة الحركية التي قد تمتلكها الحاملات المتولدة تكون قليلة قياساً إلى الطاقة المترسبة من هاتين الطاقتين، الأمر الذي قد لا يؤهل هذه الحاملات للوصول إلى السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs مما لا يترك تأثيراً في قيمة التيار. ونجد العكس فيما يخص الطاقتين (4.0، 5.1) MeV، فإن الطاقة المترسبة التي هي على الرغم من ترسبها على مسافة (11.98، 16.4) µm على الترتيب، نوعاً ما بعيدة عن السطح البيني Ta_2O_5-GaAs مقارنة بالطاقات المستخدمة الأخرى، ولكن الطاقة الكلية المترسبة تكون أكثر، وقد تؤهل حاملات الشحنة للوصول إلى السطح البيني وبطاقات أكبر مما يؤدي إلى ملاحظة تأثيراتها في قيمة التيار. لقد أعيدت النتائج وتم تكرار التشعيع بالطاقتين (1.8، 3.0) MeV لنبائط إضافية، فأظهرت النتيجة نفسها، مما يؤكد أن تأثير جسيمات ألفا يختلف تماماً عن تأثير أشعة جاما في دراسات أخرى.

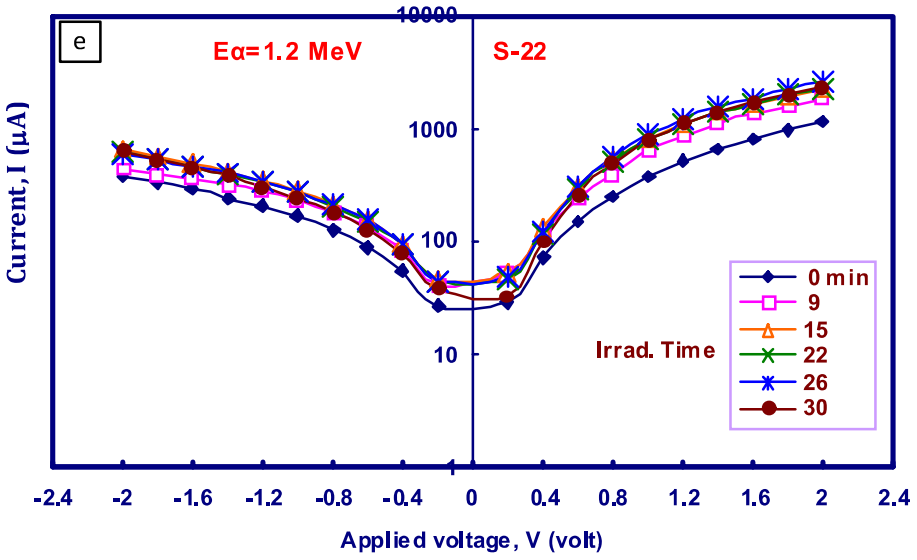
أما عند التشعيع بطاقة 1.2 MeV، فنجد أن المسألة تختلف تماماً كما يتضح من الشكل (4e). فتشعيع النبيطة بهذه الطاقة يُظهرُ تأثيراً واضحاً في خصائص النبيطة على الرغم من أن هذه الطاقة أقل من الطاقتين السابقتين. ويعود السبب في هذا إلى نقاط عدة منها: أن مقدار الطاقة المترسبة يكون كبيراً عند مدى أقصر من بقية الطاقات داخل المادة وعلى مسافة قريبة لا تتجاوز 2.872 µm من السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs، وأن هذه الطاقة قريبة من الطاقة التي يحصل عندها أعظم فقدان لطاقة ألفا في المادة (قريبة من الذروة peak في الشكل 1) التي هي بحدود ~1 MeV. لهذا يحصل أعظم ترسب للطاقة في النبيطة على مسافة قريبة من السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs مما يحدث ضرراً موقعياً كبيراً في النبيطة. ومن الجدير بالذكر أن الضرر (التلف) الحاصل من التشعيع هو ضرر دائم، لأن تأثيرات الإشعاع تبقى تقريباً نفسها بعد ترك النبيطة لمدة يوم واحد لأن طاقة الإشعاع هذه تؤثر بشكل مباشر في خواص النبيطة واستقراريتها. إن تأثير الإشعاع في خصائص MOS يعتمد على كل من زمن التشعيع أو التعريض (الجرعة)، وكذلك على معلمات تركيب النبيطة ومنها سمك العازل [15].




b
Eα= 4.0 MeV
S-34
Current, I (μA)
10000
1000
100
10
1
0.1
0 m in
3
6
9
12
15
18
22
26
30
1d aft.
Irrad. Time
-2.4 -2 -1.6 -1.2 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.2 1.6 2 2.4
Applied voltage, V (volt)


c
E?=3.0 MeV
S-28
Current, I (μA)
10000
1000
100
10
1
0.01
0 min
6
9
15
22
26
30
1d aft.
Irrad. Time
-2.4 -2 -1.6 -1.2 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.2 1.6 2 2.4
Applied voltage, V (volt)


d
Eα=1.8 MeV
S-32
Current, I (μA)
10000
1000
100
10
1
0.1
0 min
3
6
9
12
18
22
30
1d aft.
Irrad. Time
-2.4 -2 -1.6 -1.2 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 1.2 1.6 2 2.4
Applied voltage, V (volt)



الأشكال (4a-e): خصائص تيار- فولتية للنبائط المشعة بطاقات مختلفة من جسيمات ألفا بأزمان مختلفة

آلية نقل التيار في نبيطة MIS المشعة

للتعرف على آلية نقل التيار في نبيطة من نوع معدن–عازل– شبه موصل في درجة حرارة الغرفة، فقد أعيد رسم الأشكال السابقة (4 a-e) بصيغة $\left(Log\,(V^{-1}) - E^{1/2} \right)$، حيث يمثل E شدة المجال الكهربائي للنبائط القياسية غير المشعة ومثله للنبائط المشعة بجسيمات ألفا بطاقات (5.1-1.2) MeV. وبحساب الميل للجزء المستقيم للمنحنيات الناتجة، فإنه يمكن حساب عامل التأثير (β) المهيمن على نقل التيار في النبائط ومدى تأثير الإشعاع فيها. والجدول (2) يوضح قيم الميل لتلك المنحنيات.

الجدول (2): قيم الميل للنبائط القياسية غير المشعة والنبائط المشعة

النبائط المشعة بجسيمات ألفا						النبائط غير المشعة بجسيمات ألفا (قياسية)	
Sample No.	S-27	S-34	S-28	S-32*	S-22		
Eα (MeV)	5.1	4	3	1.8	1.2	Sample No.	Slope ($cm^{1/2}/\Omega\,V^{1/2}$)
Irrd. Time t_{irr} (min)	Slope ($cm^{1/2}/\Omega\,V^{1/2}$)						
0	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314	S-32	0.314
3	0.393	0.304		0.345		S-27	0.314
6	0.379	0.307	0.311	0.307		S-17	0.314
9	0.385	0.348	0.321	0.308	0.282	S-18	0.314
12	0.304	0.167		0.295		S-24	0.314
15	0.346	0.372	0.315		0.240	S- 3	0.314
18	0.356	0.363		0.302		S-14	0.314
22	0.068	0.385	0.345	0.308	0.254	S- 7	0.314
26	0.077	0.347	0.312		0.274	S-28	0.314
30	0.275	0.445	0.322	0.310	0.293		
After 1day	0.016	0.449	0.323	0.346	0.303		

**The results of the samples are normalized according to sample S-32.*

إن آلية نقل التيار في نبائط MIS المحضرة هي انبعاث شوتكي(Schottky emission) أو الانبعاث الحراري (thermo-ionic emission) لمعظم الحالات التي تُحدَد في الأغشية الرقيقة بمعدل الإلكترونات المتهيجة حرارياً التي تعبر حاجز الجهد (Voltage barrier) عند السطح البيني إلى داخل حزمة التوصيل (Conduction band) [21]، في حين كانت آلية نقل التيار هي تأثير بول- فرينكل (Poole-Frenkel) لبعض الحالات [22]. فكثافة التيار للانبعاث الحراري يمكن التعبير عنها بالمعادلة [21]:

$$J = A* T^2 \exp\{(qB_S V^{1/2} - \varphi_S)/KT\} \quad (1)$$

$$A* = \frac{4\pi m_e K^2}{h^3} \quad (2)$$

حيث J هي كثافة التيار، وq شحنة الإلكترون، وE المجال الكهربائي المسلط، وT درجة الحرارة المطلقة، وK ثابت بولتزمان، وm_e كتلة الإلكترون، وh ثابت بلانك، وφ_s ارتفاع حاجز الجهد للقوانص في العازل في السطح البيني، و$A*$ ثابت ريتشاردسون الفعال (Richardson effective constant) وقيمته تساوي 8 لـ n-GaAs حيث يعتمد على كثافة التيار [21]. إن عامل شوتكي يعطى بالمعادلة:

$$B_{seff} = \left[\frac{q}{4\pi\,\varepsilon\,\varepsilon_o\,d_{ox}}\right]^{1/2} \quad (3)$$

حيث d_{ox} سمك الأوكسيد في MOS، وε_o سماحية الفراغ، وε ثابت العزل النسبي لأوكسيد التنتاليوم (Ta_2O_5) وقيمته تساوي تقريبًا 25 [1، 23].

إن الانخفاض الحاصل من تأثير بول – فرنكل (Poole–Frenkel effect) في حاجز الجهد الكولومي للمراكز المانحة للقوانص يساوي مثلي الانخفاض الناتج من تأثير شوتكي [21]. والعلاقة التي تمثل نقل التيار بتأثير بول – فرنكل هي:

$$J = BV\exp\{(q\beta_{PF} V^{1/2} - \varphi_{PF})/KT\} \quad (4)$$

حيث B ثابت، وV الفولتية المسلطة، و β_{PF} عامل بول – فرنكل، حيث [1، 23]:

$$\beta_{PF} = \left[\frac{q}{\pi\varepsilon\varepsilon_o d_{ox}}\right]^{1/2} = 2\beta_{Seff} \quad (5)$$

ومن حساب القيمة النظرية لعامل شوتكي $\beta_{Seff}(theor.)$ من المعادلة (3) للنبيطة القياسية غير المشعة ومقارنتها بالقيم المحسوبة عملياً $\beta_{Seff}(\exp.)$ وأخذ معدل قيم β لعدد من النبائط القياسية غير المشعة كما في الجدول (3) الذي يبين قيم عامل النقل β للنبائط القياسية غير المشعة والنبائط المشعة، نجد هناك تطابقاً جيداً بين القيمتين النظرية والعملية للنبائط القياسية غير المشعة بفارق لا يتجاوز 6.33% حيث:

$$\beta_{Seff}(theor.) = 0.034 \ (Volt)^{1/2},$$

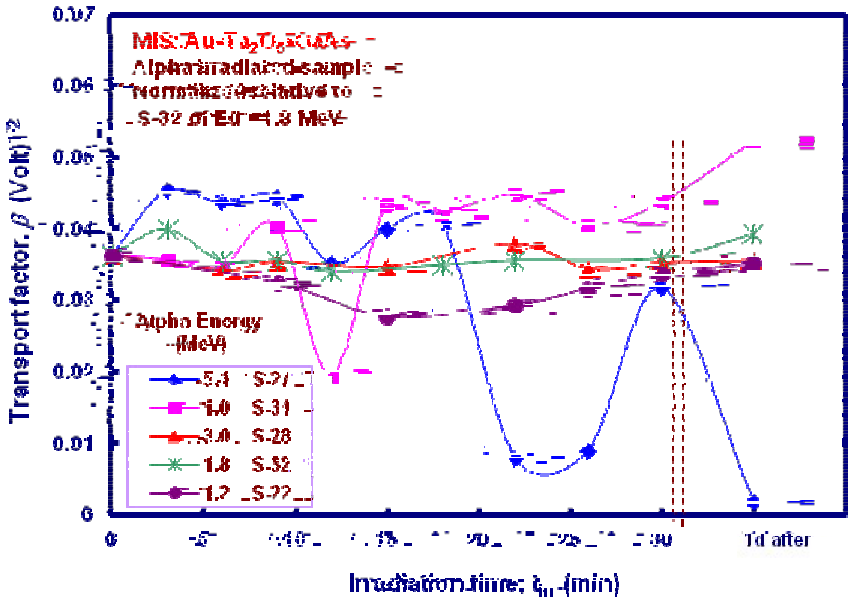
$$\beta_{Seff}(\exp.) = 0.0363\,(Volt)^{1/2}$$

أما النبائط المشعة بالطاقات (1.2، 1.8، 3) MeV فإن العامل β_{Seff} يكون فيها مقاربًا لعامل شوتكي لأزمان التشعيع المستخدمة كافة مع تغير قليل باتجاه النقصان عند الطاقة 1.2 MeV للأزمان (9-26) دقيقة، في حين يتغير بشكل كبير عند كل من الطاقتين (4، 5) MeV، فيقرب من (0.0195–0.0522) $V^{1/2}$ للطاقة 4.0 MeV ومن (0.0018–0.0454) $V^{1/2}$ للطاقة 5.1 MeV. وهذا يدل على أن هاتين الطاقتين تؤثران بشكل كبير في ارتفاع حاجز الجهد فيكون تأثير الانخفاض في ارتفاع الحاجز قليلاً عند زمن التشعيع (22، 26) دقيقة، وكذلك بعد ترك النبيطة لمدة يوم واحد فيما يخص الطاقة 5.1 MeV، وأيضًا عند زمن تشعيع 12 دقيقة للطاقة 4 MeV. والشكل (5) يوضح العلاقة بين عامل النقل (β) وزمن التشعيع للنبائط المشعة بطاقات ألفا مختلفة ولأزمان مختلفة، فيما يوضح الشكل (6) تغير عامل النقل (β) مع طاقة التشعيع للجرعات الإشعاعية كافة.

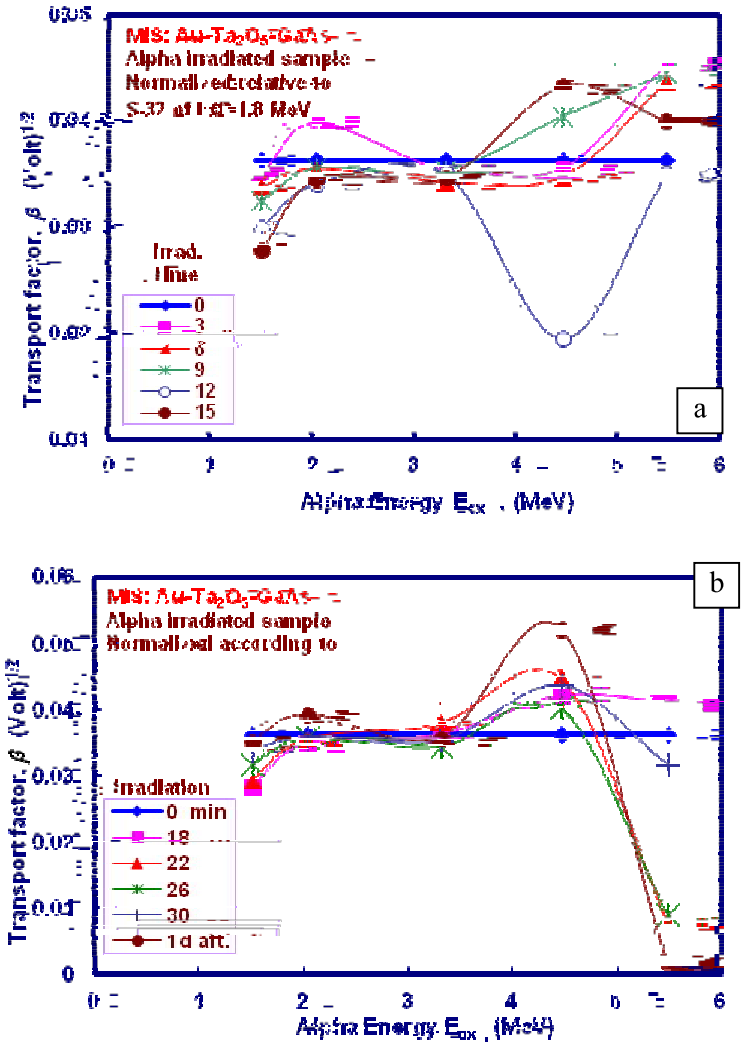
الجدول (3): قيم عامل النقل للتيار (β) للنبائط القياسية غير المشعة والنبائط المشعة بطاقات ألفا مختلفة لأزمان تشعيع مختلفة

نبائط مشعة بجسيمات ألفا						نبائط غير مشعة (قياسية)	
Sample No.	S-27	S-34	S-28	S-32*	S-22		
Eα (MeV)	5.1	4	3	1.8	1.2		
Irrd.Time t_{irr} min	β ($V^{1/2}$)					β ($V^{1/2}$)	
0	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	S-32	0.0363
3	0.0454	0.0356	….	0.0399	…..	S-27	0.0363
6	0.0437	0.0347	0.0342	0.0355		S-17	0.0363
9	0.0445	0.0405	0.0354	0.0356	0.0325	S-18	0.0363
12	0.0351	0.0195	….	0.0341	…..	S-24	0.0363
15	0.040	0.0433	0.0347	…..	0.0278	S- 3	0.0363
18	0.0411	0.0422	…..	0.0349	…..	S-14	0.0363
22	0.0079	0.0448	0.038	0.0356	0.0293	S- 7	0.0363
26	0.009	0.0404	0.0344	…..	0.0317	S-28	0.0363
30	0.0318	0.0437	0.0353	0.0359	0.0338		
After 1day	0.0018	0.0522	0.0356	0.0393	0.0351		

**The results of the samples are normalized according to sample S-32.*



الشكل (5): العلاقة بين عامل النقل للتيار (β) وزمن التشعيع بطاقات مختلفة من جسيمات ألفا



الشكل (6): العلاقة بين عامل النقل للتيار (β) وطاقة جسيمات ألفا للنبائط المشعة بأزمان تشعيع مختلفة

الاستنتاجات

من النتائج التي تم الحصول عليها أن أعظم فقدان في طاقة ألفا في النبيطة المستخدمة (أعظم ترسب للطاقة في المادة) يحدث عند 1.2 MeV، وهي قيمة تقرب من أعظم فقدان لطاقة ألفا يحدث عند 1 MeV وعلى مسافة قريبة من السطح البيني لـ Ta_2O_5-GaAs. وإن خصائص I-V للنبيطة عند التشعيع أوضحت وجود تأثير دائم في الخواص الكهربائية لطاقتي التشعيع 5.1 MeV و1.2 MeV ناتج من حصول تلف دائم في مادة النبيطة، كما اتضح وجود تأثير وقتي عند الطاقة 4 MeV، في حين أن الطاقتين (1.8، 3) MeV لم تحدثا تأثيراً ملحوظاً في خصائص النبيطة. ويلاحظ أن تأثير جسيمات ألفا في خصائص I-V للنبيطة هو تغير غير نظامي يتراوح بين زيادة ونقصان أو ثبوت في التيار مع زيادة الطاقة وكذلك مع زيادة زمن التشعيع، لأنها أشعة جسيمية تؤثر في مواقع محددة أو معينة في المادة المقصوفة وتقوم بإحداث تلف في مناطق سقوطها في حين تبقى المناطق الأخرى سليمة دون تأثير، وذلك على العكس من تأثير أشعة جاما المعروف؛ إذ يزداد التيار بشكل نظامي مع زيادة جرعات جاما لكونها تؤثر في جميع أجزاء النبيطة بالدرجة نفسها. كذلك يحدث تقويمٍ عالٍ للتيار في النبيطة لبعض حالات التشعيع عند أزمان تشعيع معينة ولطاقات معينة، بينما ينعدم في حالات أخرى من التشعيع اعتماداً على مقدار الطاقة المُشعِعة ومدى تأثيرها في النبيطة، وكذلك على زمن التشعيع بحيث يتساوى تيار الانحياز الأمامي تقريباً مع تيار الانحياز العكسي.

المصادر والمراجع

[1] Desu, C. S., Master Thesis, Materials Science and Engineering, Blacksburg, Virginia, (1998).

[2] Osburn, C.M., Kim, I., Han, S.K., De, I., Yee, K.F., Gannavaram, S., Lee, S.J., Lee, C.H., Luo, Z.J., Zhu, W., Hauser, J.R., Kwong, D.L., Lu, Covsky, G., Ma, T.P. and Ozturk, M.C., IBM J. RES. & DEV., 46(2/3) (2002) 299.

[3] Winarski, T.Y., IEEE Electrical Insulation Magazine, 17(6) (2001) 34.

[4] Russell, C.H., Owens, S.M. and Deslattes, R.D., AIP Conference Proceedings, 550(1) (2001) 140.

[5] Mohammed, M.A., J. Educ. Sci., 19 (1994) 94.

[6] Ligatchev, V., Rusli, E., Keng, L-V., Khuen, L.F., Rumin, Y. and Zhao, J., Technical Proceedings of the 2005 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Volume 2, Chapter 5, Surfaces and Films, (2005) pp. 381–384.

[7] Nathwang, W.D., Cole, M.W., Hirsch, S.G., Demaree, J.D., Ngo, E. and Hubbard, C.W., Materials Science and Technology. (Abstract) (2006).

[8] Pakma, O., Serin, N. and Serin, T., J. Mater. Sci., 44 (2009) 401.

[9] Ergin, F.B., Turan, R., Shishiyanu, S.T. and Yilmaz, E., Nucl. Instr. and Meth. in: Physics Research, B 268 (2010) 1482.

[10] Knoll, F.G., "Radiation Detection and Measurement", (John Wiley and Sons, New York, 1979).

[11] Sykes, D.A. and Harris, S.J., Nucl. Instr. and Meth., 94 (1971) 39.

[12] Zakharenkov, L.F., Kozlovskii, V.V. and Shustrov, B.A., Phys. Stat. Sol. (a), 117 (1990) 85.

[13] Smyntyna, V.A., Kulinich, O.A., Iatsunskyi, I. R. and Marchuk, I.A., Radiat. Meas., 46 (2011) 1650.

[14] Ziegler, J.F., Ziegler, M.D. and Biersack, J.P., Radiat. Meas., 37 (2003) 553.

[15] Zhu, R.Y., Nucl. Instr. and Meth. A, 413 (1998) 297.

[16] Zaininger, K.H. and Waxman, A.S., IEEE Transactions on Electron Devices, ED–16(4) (1969) 333.

[17] Derbenwich, G.F. and Gregory, B.L., IEEE Transactions on Nuclear Science, NS–22(6) (1975) 2151.

[18] Johnson, W.C., IEEE Transactions on Nuclear Science, NS–22(6) (1975) 2144.

[19] Holmes–Siedle, A.G. and Zaininger, K.H., IEEE Trans. on Reliability, 1(1) (1968) 34.

[20] Ercan Yilmaz, E., Dog˘an, I. and Turan, R., Nucl. Instr. and Meth. in: Physics Research B, 266 (2008) 4896.

[21] Simmons, J.G., "DC Conduction in Thin Films", M&B Monograph EE/5, (General ed. J. Gordon Cook,Ph.D), (FRIC, Mills & Boon, Limited, London, 1971).

[22] Gueorguiev, V.K., Aleksandrova, P.V., Ivanov, T.E. and Koprinarova, J.B., Thin Solid Films, 517 (2009) 1815.

[23] "Tantalum Pentoxide" from Wikipedia, the Free Encyclopedia (1997), "Reade Advanced Materials", P.O. Box 15039, Pawtucket Avenue; Riverside, RI, U.S.A.