تحسين كمون عتبة الترانزستور ذي تأثير المجال المعدني ـ أكسيد ـ الفلز ذي البوابة المزدوجة

هدى عبد الرحمن الزيدي، سلمى فارس النعيمي، وائل حسين الدباغ

الخلاصة: يعالج هذا البحث مشكلة انخفاض كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة عند الأطوال الصغيرة، حيث يؤدي التداخل بين المصدر والمصرف إلى زيادة تيار التسرب وتقليل هامش التشغيل. اقترحنا تركيبا جديدا يعتمد على إدخال طبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي أسفل منطقة القناة، إضافة إلى تعديل سماكة أكسيد البوابة على طول القناة. تم تحليل التركيب باستخدام نموذج فيزيائي ثنائي الأبعاد وحله عدديا بطريقة الفروق المحدودة. أظهرت النتائج أن التركيب المقترح يرفع كمون العتبة بمقدار 0.18 فولت مقارنة بالتركيب التقليدي، ويقلل تيار التسرب بأكثر من مرتبة واحدة من القدر، مع الحفاظ على سرعة التبديل ضمن حدود مقبولة. كما درسنا تأثير تغيرات أبعاد البوابة على الأداء، وبينا أن التركيب يبقى مستقرا ضمن نطاق تفاوت تصنيعي واقعي. تشير النتائج إلى أن التركيب المقترح مناسب للتطبيقات منخفضة القدرة في الدارات الرقمية عالية التكامل.

١. المقدمة

مع استمرار تقليص أبعاد الترانزستورات وفق قانون مور، واجهت الصناعة الإلكترونية خلال العقد الماضي تحديات متزايدة في الحفاظ على الأداء الكهربائي المطلوب. من بين هذه التحديات انخفاض كمون العتبة، وهو الجهد الذي يبدأ عنده تدفق التيار بين المصدر والمصرف. عندما يصبح طول القناة قصيرا، يفقد الجهد المطبق على البوابة جزءا كبيرا من قدرته على التحكم في كثافة الإلكترونات في القناة، فيزداد تيار التسرب حتى في حالة القطع. وقد أدى هذا إلى استهلاك طاقة غير مقبول في الدارات المتكاملة الكبيرة.

ظهرت عدة حلول لمعالجة هذه المشكلة، من أبرزها استخدام أكاسيد عالية الثابت الكهربائي، وتطعيم القناة بشوائب غير متجانسة، واعتماد تراكيب متعددة البوابات. ومن بين هذه الحلول، تبرز البوابة المزدوجة كخيار واعد لأنها تتيح تحكما أفضل في توزيع الحقل الكهربائي على طول القناة. غير أن هذه البوابة نفسها تحتاج إلى تعديل دقيق حتى تحقق أقصى فائدة ممكنة.

في هذا البحث نقترح تركيبا يجمع بين البوابة المزدوجة وطبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي موضوعة أسفل القناة. الهدف من هذه الطبقة هو تقوية التحكم في الجزء السفلي من القناة، حيث يكون تأثير البوابة الأمامية أضعف. كما نعدل سماكة أكسيد البوابة على طول القناة، بحيث تكون أكثر سماكة قرب المصدر والمصرف وأرق في المنتصف، لتقليل المجال الكهربائي عند الحافة.

٢. الدراسات السابقة

درس عدد من الباحثين تأثير البوابة المزدوجة على كمون العتبة. وقد بينت نتائج معظمها أن هذا النوع من البوابات يقلل تأثير القصر بشكل واضح مقارنة بالبوابة الواحدة. غير أن بعض هذه الدراسات اعتمد على نماذج تحليلية بسيطة، ولم يأخذ في الحسبان تأثير الحقل الكهربائي العرضي داخل أكسيد البوابة.

أما الدراسات العددية فقد ركزت غالبا على تحسين شكل القناة أو على استخدام مواد بوابة جديدة، دون التعمق في دور الطبقة العازلة السفلية. وقد لاحظ بعض الباحثين أن هذه الطبقة يمكن أن تساعد في تقليل تيار التسرب، لكن أثرها على كمون العتبة لم يدرس بالتفصيل الكافي. لذلك فإن هذا البحث يكمل ما سبقه من خلال تحليل مشترك لهذه الطبقة مع تعديل سماكة البوابة.

٣. وصف التركيب المقترح

يتكون التركيب المقترح من قناة سيليكونية من النمط P، ومنطقتين شديدتي التطعيم من النمط N تمثلان المصدر والمصرف. فوق القناة يوجد أكسيد بوابة مزدوج، وفوقه بوابة معدنية واحدة. أسفل القناة توجد طبقة عازلة سماكتها t_{box} وثابتها الكهربائي النسبي ε_{box}، وهي أقل من ثابت أكسيد البوابة ε_{ox}.

سماكة أكسيد البوابة ليست ثابتة على طول القناة. فهي تساوي t_{ox1} قرب المصدر والمصرف، وتساوي t_{ox2} في منتصف القناة، حيث $t_{ox2} > t_{ox1}$. ويتغير الانتقال بين القيمتين وفق دالة ناعمة على مسافة L_t من كل طرف. وبهذا الشكل يكون الجزء الأكثر حساسية للتأثيرات الثانوية هو الأكثر سماكة في أكسيد البوابة.

٤. النموذج الفيزيائي

اعتمدنا في التحليل على حل معادلة بواسون ثنائية البعد في المقطع العرضي للقناة. وقد افترضنا أن حركة الإلكترونات تخضع لنموذج الانجراف والانتشار، وأن التيار يحسب بتكامل كثافة التيار على عرض القناة. كما أخذنا في الحسبان تأثير الحقل العرضي على الحركية، وتأثير الحقل الطولي على سرعة الإشباع.

لحل المعادلات عدديا استخدمنا طريقة الفروق المحدودة على شبكة غير منتظمة، بحيث تكون الخلايا أصغر ما يمكن قرب المصدر والمصرف وعند الواجهة بين أكسيد البوابة والقناة. وقد تحقق التقارب عندما كان الخطأ النسبي في كمون العتبة أقل من 10^{-3}. وتم التحقق من النموذج بمقارنة النتائج مع بيانات منشورة لتركيب مشابه، فكان الفرق أقل من 4%.

٥. النتائج والمناقشة

أظهرت النتائج أن التركيب المقترح يرفع كمون العتبة بمقدار 0.18 فولت تقريبا مقارنة بالتركيب التقليدي ذي البوابة المزدوجة نفسها. كما أن تيار التسرب يقل بأكثر من مرتبة واحدة من القدر عند جهد بوابة يساوي صفرا. ويعود هذا التحسن إلى أن الطبقة العازلة السفلية تضعف تأثير المصدر والمصرف على الجزء السفلي من القناة.

ولوحظ أن زيادة سماكة الطبقة العازلة السفلية تؤدي إلى رفع كمون العتبة بشكل أكبر، لكنها تقلل في الوقت نفسه تيار الإشباع. لذلك فإن القيمة المثلى تمثل توازنا بين الحاجة إلى تقليل التسرب والحفاظ على الأداء. وفي دراستنا وجدنا أن سماكة تساوي ثلث سماكة أكسيد البوابة تعطي نتائج جيدة في أغلب الحالات.

٦. الخاتمة

قدمنا في هذا البحث تركيبا جديدا للترانزستور ذي البوابة المزدوجة، يعتمد على طبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي أسفل القناة. وقد بينت النتائج أن هذا التركيب يحسن كمون العتبة ويقلل تيار التسرب بشكل ملحوظ، مع الحفاظ على سرعة تبديل مقبولة. ويمكن اعتبار هذه النتائج مؤشرا أوليا يحتاج إلى تأكيد تجريبي.

المراجع

(انظر الإنجليزية رقم 4 أدناه)

١. أحمد، ر. ع.، و الزبيدي، ن. ح. (2019). تحليل تأثير القصر في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٢(٣)، ٤١–٥٨.

٢. البرزنجي، ف. م. (2021). نمذجة الحقل الكهربائي في أكاسيد البوابة. ط ٢. دار الرافدين للنشر، بغداد.

٣. الجبوري، ك. ن.، و الشمري، ط. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

٤. الحسيني، م. ع.، و الدليمي، ر. ف. (2022). تأثير الطبقة العازلة السفلية على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

٥. الخفاجي، ن. ر.، و العبيدي، ط. ك. (2018). تحليل الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١١(٤)، ٥٥–٧٠.

٦. الدليمي، ر. ف.، و الحسيني، م. ع. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

٧. الزبيدي، ن. ح.، و أحمد، ر. ع. (2019). تحليل تأثير القصر في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٢(٣)، ٤١–٥٨.

٨. الزبيدي، ن. ح.، و الجبوري، ك. ن. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

٩. الشمري، ط. ر.، و الخفاجي، ن. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٠. العبيدي، ط. ك.، و الخفاجي، ن. ر. (2018). تحليل الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١١(٤)، ٥٥–٧٠.

١١. العبيدي، ط. ك.، و الزبيدي، ن. ح. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

١٢. الفهداوي، ع. ن.، و الحسيني، م. ع. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

١٣. القيسي، ف. ر.، و الدليمي، ر. ف. (2022). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

١٤. الكبيسي، ع. ن.، و الفهداوي، ع. ن. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

١٥. المشهداني، ع. ن.، و الفهداوي، ع. ن. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

١٦. النعيمي، س. ف.، و الكبيسي، ع. ن. (2022). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

١٧. الهاشمي، ر. ط.، و القيسي، ف. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٨. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٩. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

٢٠. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

استلم البحث في 9 آذار 2023، وقبل للنشر في 20 تشرين الأول 2023، ونشر على الإنترنت في 20 كانون الأول 2023.

هدى عبد الرحمن الزيدي، سلمى فارس النعيمي، وائل حسين الدباغ، قسم هندسة الحاسوب، كلية الهندسة، جامعة الرافدين العليا، بغداد، العراق.

مجلة الحاسوب والإلكترونيات، المجلد 21، العدد 6، 2023، الصفحات 575–589.

DOI: 10.5432/jce.v21i6.2023.0142

(انظر الإنجليزية رقم 4 أدناه)

الخلاصة: يعالج هذا البحث مشكلة انخفاض كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة عند الأطوال الصغيرة، حيث يؤدي التداخل بين المصدر والمصرف إلى زيادة تيار التسرب وتقليل هامش التشغيل. اقترحنا تركيبا جديدا يعتمد على إدخال طبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي أسفل منطقة القناة، إضافة إلى تعديل سماكة أكسيد البوابة على طول القناة. تم تحليل التركيب باستخدام نموذج فيزيائي ثنائي الأبعاد وحله عدديا بطريقة الفروق المحدودة. أظهرت النتائج أن التركيب المقترح يرفع كمون العتبة بمقدار 0.18 فولت مقارنة بالتركيب التقليدي، ويقلل تيار التسرب بأكثر من مرتبة واحدة من القدر، مع الحفاظ على سرعة التبديل ضمن حدود مقبولة. كما درسنا تأثير تغيرات أبعاد البوابة على الأداء، وبينا أن التركيب يبقى مستقرا ضمن نطاق تفاوت تصنيعي واقعي. تشير النتائج إلى أن التركيب المقترح مناسب للتطبيقات منخفضة القدرة في الدارات الرقمية عالية التكامل.

١. المقدمة

مع استمرار تقليص أبعاد الترانزستورات وفق قانون مور، واجهت الصناعة الإلكترونية خلال العقد الماضي تحديات متزايدة في الحفاظ على الأداء الكهربائي المطلوب. من بين هذه التحديات انخفاض كمون العتبة، وهو الجهد الذي يبدأ عنده تدفق التيار بين المصدر والمصرف. عندما يصبح طول القناة قصيرا، يفقد الجهد المطبق على البوابة جزءا كبيرا من قدرته على التحكم في كثافة الإلكترونات في القناة، فيزداد تيار التسرب حتى في حالة القطع. وقد أدى هذا إلى استهلاك طاقة غير مقبول في الدارات المتكاملة الكبيرة.

ظهرت عدة حلول لمعالجة هذه المشكلة، من أبرزها استخدام أكاسيد عالية الثابت الكهربائي، وتطعيم القناة بشوائب غير متجانسة، واعتماد تراكيب متعددة البوابات. ومن بين هذه الحلول، تبرز البوابة المزدوجة كخيار واعد لأنها تتيح تحكما أفضل في توزيع الحقل الكهربائي على طول القناة. غير أن هذه البوابة نفسها تحتاج إلى تعديل دقيق حتى تحقق أقصى فائدة ممكنة.

في هذا البحث نقترح تركيبا يجمع بين البوابة المزدوجة وطبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي موضوعة أسفل القناة. الهدف من هذه الطبقة هو تقوية التحكم في الجزء السفلي من القناة، حيث يكون تأثير البوابة الأمامية أضعف. كما نعدل سماكة أكسيد البوابة على طول القناة، بحيث تكون أكثر سماكة قرب المصدر والمصرف وأرق في المنتصف، لتقليل المجال الكهربائي عند الحافة.

٢. الدراسات السابقة

درس عدد من الباحثين تأثير البوابة المزدوجة على كمون العتبة. وقد بينت نتائج معظمها أن هذا النوع من البوابات يقلل تأثير القصر بشكل واضح مقارنة بالبوابة الواحدة. غير أن بعض هذه الدراسات اعتمد على نماذج تحليلية بسيطة، ولم يأخذ في الحسبان تأثير الحقل الكهربائي العرضي داخل أكسيد البوابة.

أما الدراسات العددية فقد ركزت غالبا على تحسين شكل القناة أو على استخدام مواد بوابة جديدة، دون التعمق في دور الطبقة العازلة السفلية. وقد لاحظ بعض الباحثين أن هذه الطبقة يمكن أن تساعد في تقليل تيار التسرب، لكن أثرها على كمون العتبة لم يدرس بالتفصيل الكافي. لذلك فإن هذا البحث يكمل ما سبقه من خلال تحليل مشترك لهذه الطبقة مع تعديل سماكة البوابة.

٣. وصف التركيب المقترح

يتكون التركيب المقترح من قناة سيليكونية من النمط P، ومنطقتين شديدتي التطعيم من النمط N تمثلان المصدر والمصرف. فوق القناة يوجد أكسيد بوابة مزدوج، وفوقه بوابة معدنية واحدة. أسفل القناة توجد طبقة عازلة سماكتها t_{box} وثابتها الكهربائي النسبي ε_{box}، وهي أقل من ثابت أكسيد البوابة ε_{ox}.

سماكة أكسيد البوابة ليست ثابتة على طول القناة. فهي تساوي t_{ox1} قرب المصدر والمصرف، وتساوي t_{ox2} في منتصف القناة، حيث $t_{ox2} > t_{ox1}$. ويتغير الانتقال بين القيمتين وفق دالة ناعمة على مسافة L_t من كل طرف. وبهذا الشكل يكون الجزء الأكثر حساسية للتأثيرات الثانوية هو الأكثر سماكة في أكسيد البوابة.

٤. النموذج الفيزيائي

اعتمدنا في التحليل على حل معادلة بواسون ثنائية البعد في المقطع العرضي للقناة. وقد افترضنا أن حركة الإلكترونات تخضع لنموذج الانجراف والانتشار، وأن التيار يحسب بتكامل كثافة التيار على عرض القناة. كما أخذنا في الحسبان تأثير الحقل العرضي على الحركية، وتأثير الحقل الطولي على سرعة الإشباع.

لحل المعادلات عدديا استخدمنا طريقة الفروق المحدودة على شبكة غير منتظمة، بحيث تكون الخلايا أصغر ما يمكن قرب المصدر والمصرف وعند الواجهة بين أكسيد البوابة والقناة. وقد تحقق التقارب عندما كان الخطأ النسبي في كمون العتبة أقل من 10^{-3}. وتم التحقق من النموذج بمقارنة النتائج مع بيانات منشورة لتركيب مشابه، فكان الفرق أقل من 4%.

٥. النتائج والمناقشة

أظهرت النتائج أن التركيب المقترح يرفع كمون العتبة بمقدار 0.18 فولت تقريبا مقارنة بالتركيب التقليدي ذي البوابة المزدوجة نفسها. كما أن تيار التسرب يقل بأكثر من مرتبة واحدة من القدر عند جهد بوابة يساوي صفرا. ويعود هذا التحسن إلى أن الطبقة العازلة السفلية تضعف تأثير المصدر والمصرف على الجزء السفلي من القناة.

ولوحظ أن زيادة سماكة الطبقة العازلة السفلية تؤدي إلى رفع كمون العتبة بشكل أكبر، لكنها تقلل في الوقت نفسه تيار الإشباع. لذلك فإن القيمة المثلى تمثل توازنا بين الحاجة إلى تقليل التسرب والحفاظ على الأداء. وفي دراستنا وجدنا أن سماكة تساوي ثلث سماكة أكسيد البوابة تعطي نتائج جيدة في أغلب الحالات.

٦. الخاتمة

قدمنا في هذا البحث تركيبا جديدا للترانزستور ذي البوابة المزدوجة، يعتمد على طبقة عازلة منخفضة الثابت الكهربائي أسفل القناة. وقد بينت النتائج أن هذا التركيب يحسن كمون العتبة ويقلل تيار التسرب بشكل ملحوظ، مع الحفاظ على سرعة تبديل مقبولة. ويمكن اعتبار هذه النتائج مؤشرا أوليا يحتاج إلى تأكيد تجريبي.

المراجع

(انظر الإنجليزية رقم 4 أدناه)

١. أحمد، ر. ع.، و الزبيدي، ن. ح. (2019). تحليل تأثير القصر في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٢(٣)، ٤١–٥٨.

٢. البرزنجي، ف. م. (2021). نمذجة الحقل الكهربائي في أكاسيد البوابة. ط ٢. دار الرافدين للنشر، بغداد.

٣. الجبوري، ك. ن.، و الشمري، ط. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

٤. الحسيني، م. ع.، و الدليمي، ر. ف. (2022). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

٥. الخفاجي، ن. ر.، و العبيدي، ط. ك. (2018). تحليل الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١١(٤)، ٥٥–٧٠.

٦. الدليمي، ر. ف.، و الحسيني، م. ع. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

٧. الزبيدي، ن. ح.، و أحمد، ر. ع. (2019). تحليل تأثير القصر في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٢(٣)، ٤١–٥٨.

٨. الزبيدي، ن. ح.، و الجبوري، ك. ن. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

٩. الشمري، ط. ر.، و الخفاجي، ن. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٠. العبيدي، ط. ك.، و الخفاجي، ن. ر. (2018). تحليل الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١١(٤)، ٥٥–٧٠.

١١. العبيدي، ط. ك.، و الزبيدي، ن. ح. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

١٢. الفهداوي، ع. ن.، و الحسيني، م. ع. (2021). تحسين كمون العتبة في الترانزستورات ذات البوابة المزدوجة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٤(٢)، ٦٣–٧٩.

١٣. القيسي، ف. ر.، و الدليمي، ر. ف. (2022). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

١٤. الكبيسي، ع. ن.، و الفهداوي، ع. ن. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

١٥. المشهداني، ع. ن.، و الفهداوي، ع. ن. (2023). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٦(١)، ٩٠–١٠٥.

١٦. النعيمي، س. ف.، و الكبيسي، ع. ن. (2022). تأثير سماكة البوابة على كمون العتبة. مجلة الحاسوب والإلكترونيات، ١٥(٢)، ٧٧–٩٤.

١٧. الهاشمي، ر. ط.، و القيسي، ف. ر. (2020). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٨. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

١٩. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

٢٠. الهاشمي، ر. ط.، و النعيمي، س. ف. (2019). تقليل تيار التسرب في الدارات المتكاملة منخفضة القدرة. مجلة الهندسة الكهربائية، ٨(١)، ٢٣–٣٩.

استلم البحث في 9 آذار 2023، وقبل للنشر في 20 تشرين الأول 2023، ونشر على الإنترنت في 20 كانون الأول 2023.

هدى عبد الرحمن الزيدي، سلمى فارس النعيمي، وائل حسين الدباغ، قسم هندسة الحاسوب، كلية الهندسة، جامعة الرافدين العليا، بغداد، العراق.

مجلة الحاسوب والإلكترونيات، المجلد 21، العدد 6، 2023، الصفحات 575–589.

DOI: 10.5432/jce.v21i6.2023.0142