

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "

اعداد : د. رضوان المحمد

الملخص:

مع ظهور طفرة الذكاء الاصطناعي باتت الحاجة ملحة لمعالجات سريعة وذات كفاءة عالية جدا لمعالجة البيانات وتوليد الإجابات، وهذا استدعى تطوير البنية الالكترونية للرقائق المتقدمة من خلال ادخال المعادن النادرة في تكوين السيليكون للوصول إلى الأداء المطلوب. تعتبر الخواص المغناطيسية العالية التي تتمتع بها المعادن النادرة من أبرز الميزات التي ساعدت على استقرار عمل الرقائق الالكترونية المتقدمة ولا سيما عند الوصول إلى الأبعاد النانوية المنخفضة.

يُقدم هذا البحث شرحاً مفصلاً لأهم العناصر النادرة ذات الخواص المغناطيسية التي يمكن استخدامها في الرقائق المتقدمة وتم بناء نموذج يحدد درجة المغناطيسية لهذه العناصر بشكل يسمح بالتنبؤ بأفضلية اختيار العنصر النادر وفق الأداء المطلوب للرقائق المراد تصميمها. تُقدم هذه الورقة إطاراً تحليلياً يُسهم في فهم السلوكيات الفيزيائية للعناصر الأرضية النادرة، ويدعم الجهود الهندسية نحو إدماجها الفعال في بنية الرقائق المتقدمة.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي، المعادن الأرضية النادرة، الرقائق الالكترونية المتقدمة، تحسين الأداء.

Modeling Electronic and Magnetic Properties of Rare Earth Elements for High-Performance Advanced

Abstract:

With the advent of the Artificial Intelligence (AI) boom, there is an urgent demand for ultra-fast, high-efficiency processors capable of handling complex data processing and generation tasks. This has necessitated the evolution of advanced chip electronic architectures through the integration of Rare Earth Elements (REEs) into the silicon matrix to achieve the requisite performance standards. The superior magnetic properties inherent to REEs are identified as critical factors enhancing the operational stability of advanced electronic chips, particularly as device scaling approaches the lower nanometer regime.

This study provides a comprehensive analysis of key magnetic REEs viable for integration into advanced semiconductor devices. Furthermore, an analytical model has been developed to quantify the magnetic magnitude of these elements, enabling the predictive selection of the optimal REE based on the specific performance metrics required for the target chip design. Consequently, this research provides an analytical framework that contributes to understanding the physical behaviors of REEs, thereby supporting engineering efforts toward their effective integration into advanced chip architectures.

Key words: Artificial Intelligence (AI), Rare Earth Elements (REEs), Advanced Electronic Chips, Performance Optimization.

1- المقدمة:

يشهد العالم اليوم تحولاً جذرياً في مشهد التكنولوجيا الرقمية، مدفوعاً بالطفرة الهائلة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي (AI) والبيانات الضخمة (Big Data). هذا التطور المتسارع فرض تحديات غير مسبوقة على صناعة أشباه الموصلات، حيث باتت الحاجة ملحة لمعالجات قادرة على التعامل مع كميات هائلة من البيانات بسرعة فائقة وكفاءة طاقة عالية. ومع اقتراب تقنية السيليكون التقليدية (CMOS) من حدودها الفيزيائية القصوى - فيما يعرف بنهاية قانون مور (Moore's Law) - أصبح البحث عن مواد بديلة أو مكملة للسيليكون ضرورة حتمية لاستمرار التطور التقني. في هذا السياق، تبرز العناصر الأرضية النادرة (Rare Earth Elements - REEs) كمرشح استراتيجي لإحداث نقلة نوعية في هندسة الرقائق المتقدمة. تتميز هذه العناصر بخصائص إلكترونية ومغناطيسية فريدة، نابعة من مداراتها الإلكترونية الداخلية (4f) المحمية، مما يمنحها عزماً مغناطيسياً عالياً واستقراراً كمومياً لا يتوفر في مواد أشباه الموصلات التقليدية. إن دمج هذه العناصر في مصفوفة السيليكون (Silicon Matrix) يفتح الباب أمام جيل جديد من الأجهزة الإلكترونية التي تعتمد على "السبينترونكس" (Spintronics)، حيث يتم استغلال العزم المغزلي للإلكترون (Spin) بجانب شحنته، مما يضاعف سرعة المعالجة ويقلل استهلاك الطاقة بشكل كبير.

يركز هذا البحث على دراسة ونمذجة الخصائص الفيزيائية لثلاثة عناصر مختارة بعناية: الجادولينيوم (Gd)، الديسبروسيوم (Dy)، والنيوديميوم (Nd) تم اختيار هذه العناصر لتمثيل طيف واسع من الخصائص المغناطيسية، بدءاً من العزم المغناطيسي الهائل للديسبروسيوم، مروراً بالاستقرار الحراري للجادولينيوم، وصولاً إلى التحديات الهيكلية للنيوديميوم.

يهدف البحث إلى بناء نموذج تحليلي متكامل (Analytical Model) قادر على التنبؤ بسلوك هذه العناصر عند دمجها في السيليكون، وتقييم صلاحيتها للتطبيقات الصناعية بناءً على معايير

دقيقة تشمل: قوة الإشارة المغناطيسية، الاستقرار الحراري عند درجات حرارة التشغيل، والتوافق الهيكلي مع شبكة السيليكون. من خلال هذا النموذج، يسعى البحث لتقديم خارطة طريق هندسية تساعد مصممي الرقائق على اختيار العنصر الأمثل للتطبيق المطلوب، مما يساهم في ردم الفجوة بين الفيزياء النظرية والتطبيق الصناعي في عصر ما بعد السيليكون.

2- مشكلة البحث:

تتمحور مشكلة البحث حول التحديات التالية:

1. قصور تقنية السيليكون التقليدية (CMOS) : وصول الترانزستورات الحالية إلى حدودها الفيزيائية والحرارية، مما يعيق تلبية متطلبات السرعة الفائقة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي.
2. افتقار السيليكون للمغناطيسية الذاتية : عجز مادة السيليكون عن دعم تقنيات "السبينترونيك (Spintronics) " التي تدمج المعالجة والتخزين، مما يستوجب دمج عناصر خارجية.
3. عقبات الدمج الفيزيائي : صعوبة تحقيق استقرار حراري وتوافق هيكلي عند دمج العناصر الأرضية النادرة (REEs) داخل شبكة السيليكون دون التسبب بعيوب بلورية.
4. غياب نموذج الاختيار الأمثل : عدم وجود إطار تحليلي دقيق يوجه المصممين لاختيار العنصر النادر الأنسب (Gd, Dy, Nd) بناءً على الأداء المطلوب للرقاقة.

3- هدف البحث:

يهدف البحث إلى تحقيق ما يلي:

1. نمذجة السلوك الفيزيائي للعناصر النادرة : بناء إطار تحليلي دقيق يربط الخصائص الذرية للعناصر (Gd, Dy, Nd) بأدائها داخل السيليكون.

2. تقييم الكفاءة المغناطيسية والحرارية: تحديد مدى صلاحية كل عنصر لتطبيقات الرقائق المتقدمة بناءً على عزمه المغناطيسي واستقراره الحراري.
3. تحليل التوافق الهيكلي: دراسة تأثير دمج العناصر النادرة على استقرار شبكة السيليكون البلورية وتقليل عيوب التصنيع.
4. تطوير معيار المفاضلة الهندسي (ICE – Integrated Chip Efficiency): صياغة أداة قرار رياضية توجه المصممين لاختيار العنصر الأمثل وفق متطلبات الأداء المحددة.

4- الدراسات المرجعية:

تنوعت الدراسات الحديثة حول العناصر الأرضية النادرة (REEs) لتشمل مجالات الاستدامة، الفيزياء النظرية، والتطبيقات الصناعية والطبية. في البداية، ركز البحث [1] على الجانب البيئي والاقتصادي من خلال تطوير طرق مبتكرة لإعادة تدوير مغناطيسات NdFeB، مما يضمن استدامة الموارد اللازمة للصناعات المتقدمة. ومن منظور الفيزياء الحاسوبية، قدم [2] حسابات دقيقة للمبادئ الأولى (First-principles) لفهم عمليات التمثغظ في المغناطيسات الدائمة، بينما بحث [3] تأثير ضبط موقع أيون (RE^{+3}) وطاقة الارتباط (U) على الخصائص الإلكترونية والميكانيكية، مقدماً رؤية عميقة حول تفاعلات المدارات (4f). وفي سياق التطبيقات العملية، استعرض [4] استخدام أكاسيد المعادن النادرة في المستشعرات الكهروكيميائية لتعزيز نقل الإلكترونات، وناقش [5] تحسين البنية المجهرية لمغناطيسات Nd-Fe-B الملبدة لزيادة القوة القسرية. كما توسعت الأبحاث لتشمل تحسين السبائك المعدنية، حيث درس [6] تأثير انتشار حدود الحبيبات باستخدام سبائك (Tb-Cu) و (Nd-Cu) لتعزيز الخصائص المغناطيسية غير المتناحية. ولم تقتصر التطبيقات على الإلكترونات والمغناطيسات، بل امتدت لتشمل حماية المواد، حيث أوضح [7] دور العناصر النادرة في تحسين مقاومة التآكل للطلاءات، وتناول [8] استخدام المواد النانوية المعتمدة على العناصر النادرة في التطبيقات الطبية لعلاج الأورام. أخيراً، قدم [9] دراسة حول تخليق وخصائص المعقدات الجزيئية للعناصر النادرة، مركزاً على البنية الكيميائية وتأثيرها على الخصائص الفيزيائية.

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق
المتقدمة عالية الأداء "

رغم التغطية الواسعة لهذه الدراسات [1-9] لمجالات المغناطيسات الدائمة، المستشعرات، والتطبيقات الطبية، إلا أنها أغفلت بشكل ملحوظ دراسة الدمج المباشر لعناصر (Gd, Dy, Nd) داخل مصفوفة السيليكون (Silicon Matrix) لتطوير رقائق حاسوبية فائقة الأداء. تفنقر الأدبيات الحالية إلى نموذج تحليلي هندسي (Engineering Analytical Model) يربط بين الخصائص الذرية للعنصر النادر ومتطلبات تصنيع الرقائق (الاستقرار الحراري والتوافق الشبكي) في أن واحد، وهو ما يهدف هذا البحث لسده من خلال تقديم "معامل كفاءة الرقاقة المتكامل (ICEI) " .

5- تعريف المعادن الأرضية النادرة وخصائصها:

تُعرّف العناصر الأرضية النادرة (Rare Earth Elements - REEs) وفقاً للاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية (IUPAC) بأنها مجموعة مكونة من سبعة عشر عنصراً تشمل: السكندنيوم (Sc, Z=21) ، واليتريوم (Y, Z=39) ، إضافةً إلى سلسلة اللانثانيدات (Lanthanides) الخمسة عشر من اللانثانوم (La, Z=57) حتى اللوتيتيوم (Lu, Z=71) [10] .

على الرغم من تسميتها "نادرة"، فإن معظمها يتوفر بوفرة معقولة في القشرة الأرضية، غير أن ندرتها تعود إلى تشتتها الجغرافي وصعوبة استخراجها بصورة منفردة نظراً لتشابه خصائصها الكيميائية [11] .

تُقسّم هذه العناصر تقليدياً إلى مجموعتين رئيسيتين حسب العدد الذري كما يظهر في الجدول (1):

الجدول (1): تصنيف المعادن الأرضية النادرة.

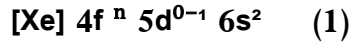
المجموعة	العناصر	نطاق العدد الذري
العناصر الأرضية النادرة الخفيفة (Light REEs)	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd + Sc	Z = 57 ~ 64

العناصر الأرضية النادرة الثقيلة (Heavy REEs)	Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu + Y	Z = 65 ~ 71
---	-----------------------------------	-------------

ملاحظة: تم إضافة العنصرين (السكانديوم واليتريوم) إلى مجموعة العناصر النادرة على الرغم من اختلاف العدد الذري لها عن عنصر اللانثانيدات بسبب السلوك الجيوكيميائي وتشابه الخصائص الأيونية معها هذا من ناحية ومن ناحية أخرى تم تصنيف السكانديوم مع مجموعة العناصر النادرة الخفيفة بسبب تواجده في نفس رواسبها وبالمقابل يصنف اليتريوم على أنه عنصر ثقيل بسبب تواجده مع رواسب العناصر الأرضية النادرة الثقيلة [12].

- التركيب الإلكتروني :

تتميز اللانثانيدات بامتلاكها مدار (4f) غير المُكتمل، وهو ما يُشكّل الأساس الجوهري لخصائصها الإلكترونية والمغناطيسية الفريدة، يمكن كتابة التركيب الإلكتروني العام لهذه العناصر على النحو التالي:



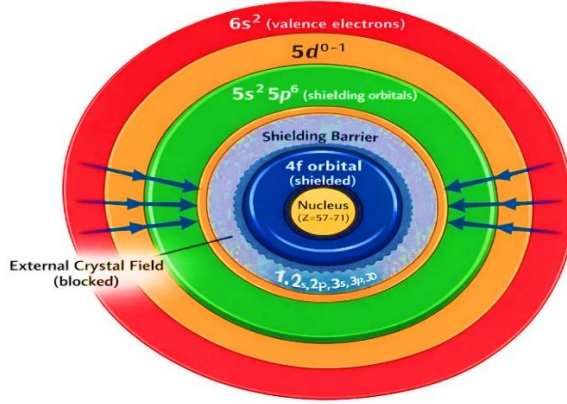
حيث أن:

- [Xe] نواة الزينون (Xenon Core): التي يبلغ عددها الذري (54) يتم وضعها في صيغ التركيب الإلكتروني للمعادن النادرة من أجل الاختصار.
- المدار 4f : هو المدار المسؤول عن كل الخصائص المغناطيسية والبصرية الاستثنائية لللانثانيدات و يتسع لـ (n = 1~14) الكترونات.
- المدار 5d: قد يحتوى هذا المدار على الكترون في التركيب الإلكتروني لبعض العناصر النادرة من أجل الوصول لحالة الاستقرار.
- المدار 6s: هذا المدار يحتوي على الكترون التكافؤ في عناصر اللانثانيدات التي تفقدها أولاً عندما تتأين.

الجدير بالذكر يقع المدار 4f في عناصر اللانثانيدات داخلياً محاطاً بمجموعة من المدارات الأخرى كما في الشكل (1) وهذا ما يعرف بـ (Shielding Effect) ويمنح العناصر الأرضية النادرة

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق المتقدمة عالية الأداء "

مجموعة من العناصر الفريدة أبرزها ثبات الخصائص المغناطيسية مما يمنحها أداء مستقر في الرقائق.



الشكل(1): المدارات الإلكترونية للعناصر الأرضية النادرة (REEs).

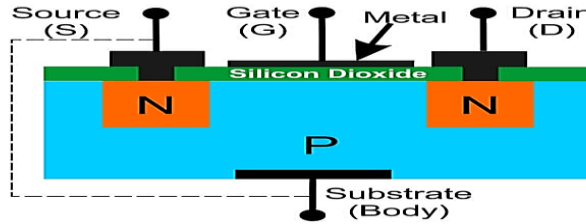
6- الخواص المغناطيسية المدروسة عند إدخال العنصر في بلورة السيليكون:

نظراً للعيوب التي تعاني منها أكاسيد السيليكون في العزل مما يسبب ظهور النفق الكمومي وتشكل تيارات التسريب التي تؤثر بشكل كبير على أداء الرقائق المتقدمة التي تتطلب تصغير في حجم ترانستورات البنية إلى أبعاد أصغر من (2) نانو ، مما سبب إختلال في قانون مور الذي يفترض أن أداء المعالجات سيتضاعف كل سنتين نتيجة زيادة عدد الترنستورات إلى الضعف بتصغير أبعادها.

مع ظهور حاجة ملحة لزيادة أداء و سرعة المعالجات نظرا لظهور تطبيقات الذكاء الاصطناعي بدأ التفكير بشكل جدي للتخلص من عيوب تيارات التسريب التي سببت في استهلاك أكبر للطاقة و أظهرت أثر حراري عالي سبب تلف الرقائق، جاءت المعادن النادرة حلاً لهذه المشكلة لما تتمتع من من خصائص مغناطيسية و عازلية جعلت من الترنستورات أكثر ثباتاً و مناعة للتيارات التسريب التي تظهر بشكل كبير عند إنخفاض الأبعاد من خلال إدخالها في بنية السيليكون بدلاً من المواد التقليدية المستخدمة، بعبارة مختصرة استطاعت الرقائق المتقدمة عالية الأداء من خلال إدخال العناصر النادرة في بنية السيلكون المُصنَّع لترنستوراتها أن تجعل من العيوب الكمومية

التي تظهر في الابعاد النانوية الصغيرة أمراً عديم التأثير بل و استفادت من الخصائص المغناطيسية الفريدة لها بجعل هذه الكمومية منفعة و سلوك جديد في تصنيع معالجات الحواسيب الكمومية ذات الكفاءة العالية.

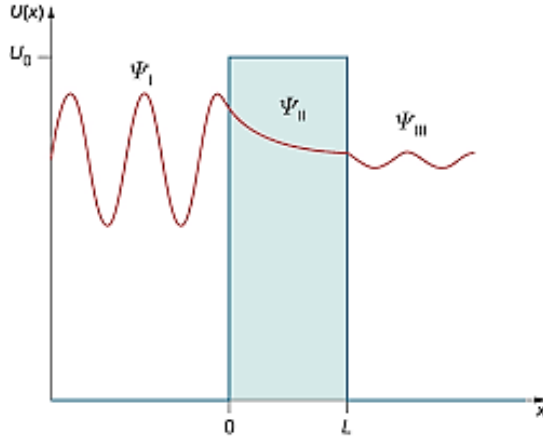
لفهم الموضوع بشكل أعمق، نوضح المشكلة والحل بتسلسل منهجي ومباشر، لتجاوز التعقيدات المعتادة في الأدبيات المرتبطة بهذا الشأن. حيث يوضح الشكل(2) ترانزستور من النوع (MOSFET) وهو المُستخدم في تصنيع المعالجات والرقائق المنتشرة ويعتمد في بنيته على السيلكون النقي والمُشاب لتشكل الأقطاب الثالثة المنبع (S) والمصرف (D) والقاعدة (G)، ولدينا طبقة العازل اكسيد السيليكون (SiO₂) التي تشكل عزل البوابة، مبدأ العمل ببساطة عند تطبيق جهد موجب اعلى من الصفر على البوابة تتشكل قناة سالبة ناتجة عن الالكترونات تُشكّل قناة تربط بين المنبع والمصرف مما يسمح بانتقال الشحنات ومرور تيار أي التحكم بالبوابة من خلال الجهد ومرور التيار أو عدمه يمثل المنطق الرقمي الذي تُبنى عليه جميع المعالجات في العالم، استمر العمل على هذا النوع من الترانستورات إلى أن وصلنا إلى ابعاد نانوية بسماكة عازل صغيرة جداً والذي يقع تحت معدن البوابة لدرجة سمحت بتشكّل ما يدعى بالنفق الكمومي أو (تيار التسريب) الذي سبب أثراً سلبياً كبيراً على الأداء.



الشكل(2): البنية الداخلية لترانزستور (MOSFET).

يمكن فهم ظاهر النفق الكمومي بشكل واضح من خلال الشكل (3) الذي يُظهر الدالة الموجية للالكترونات التي تضرب بحاجز (عازل) وتؤدي هذه الظاهرة الكمومية إلى نفاذ جزء من الموجة الإلكترونية عبر الحاجز العازل، مما يُولّد (تيار تسريب) يُعد من أبرز العيوب التشغيلية لكونه يزيد من استهلاك الطاقة ويرفع العبء الحراري للرقائق. ويُعزى حدوث ذلك إلى تصرف الإلكترون وفقاً لخصائصه الموجية، متجاوزاً بذلك سلوكه الكلاسيكي المعتاد كجسيم مشحون. حقيقة هذه

الظاهرة لا تزال لغزاً فيزيائياً يُدرس إلى وقتنا الراهن، لا يهمننا تفسير الظاهرة و إنما أثرها وهو النفق الكمومي وتيار التسريب الذي سبب مشكلة في أداء الترانستور وبالتالي ظهور عيوب في الرقائق عند الأبعاد النانوية الصغيرة تستوجب حلاً ما .



الشكل(3): السلوك الموجي للإلكترون و تشكّل ظاهرة النفق الكمومي.

المعضلة الهندسية تكمن بفيزياء الكم حيث أن زيادة سرعة الترانستور تتطلب زيادة سعة البوابة المعطاة في العلاقة (2):

$$C = \frac{A \cdot \epsilon \cdot k}{t} \quad (2)$$

حيث أن العلاقة عكسية بين السعة الكهربائية وسماكة العازل (t) فعندما تقل السماكة عن (2) نانومتر تظهر مشكلة النفق الكمي وتيار التسريب، في حين أن العلاقة طردية مع ثابت العزل (k) الذي يأخذ قيمة تساوي (3.9) للسيلكون .

عند استخدام أحد أنواع أكسيد المعادن الأرضية النادرة يمكن أن تتضاعف هذه القيمة لثابت العزل إلى سبعة أضعاف لتصل تقريبا إلى (30) بالنسبة لأكسيد اللانثانوم وهذا يسمح بزيادة السعة بشكل أكبر عند سماكات عزل منخفضة جداً مقارنة مع الأكاسيد التقليدية ومن هنا نفهم أهمية و دور المعادن النادرة في تغيير خواص الترانستورات بشكل يزيد من سرعتها عند تقليل حجمها وهذا ما يسمح بزيادة أداء الرقائق الداخلة في تركيبها .

بالمناسبة لا تدخل المواد النادرة فقط في تصنيع عوازل البوابات فقط وإنما تدخل أيضاً في معادن الأقطاب وسطوح تلامسها مع الطبقة الأساسية و داخل تجويف المصدر/المصرف مما يسمح بمرور تيارات أكبر و كذلك حركية أكبر لزيادة سرعة الكترونات القناة و كل ذلك سمح بأداء أكبر ب(1000) مرة على أداء الترانستورات التقليدية التي بنفس الحجم مع استهلاك طاقة أقل.
بعبارة مختصرة : السيليكون هو "الجسد (The Body) "، لكن العناصر الأرضية النادرة أصبحت هي "الروح (The Soul) " للإلكترونيات الحديثة والرقائق المتقدمة.

7- أهم الخواص المغناطيسية والفيزيائية للمعادن الأرضية النادرة:

يوجد لدينا العديد من الخصائص المغناطيسية والفيزيائية للمعادن النادرة التي تؤثر في أداء الرقائق المتقدمة عند ادخالها في بلورة السيليكون سنذكر ثلاثة منها لتبرير اختيار العناصر (Gd, Dy, Nd) المُختارة في دراسة البحث.

- العزم المغناطيسي الفعال (Effective Magnetic Moment):

حدد هذا العامل "قوة الإشارة" المغناطيسية. كلما زادت القيمة، زادت قدرة العنصر على تخزين المعلومات (High Density Storage) وزادت كفاءة التبديل المغناطيسي في أجهزة السبينترونيك، وهنا تم اختيار العنصر النادر الجادولينيوم (Gd) الذي يقع في منتصف السلسلة كما يظهر في الشكل (4) ويمتلك سبع الكترونات غير متزاوجة ($4f^7$) وهذا يمنحه أعلى عزم مغناطيسي نقي.

- التباين المغناطيسي (Magnetic Anisotropy):

يحدد "استقرار البت (Bit Stability)" التباين العالي يعني أن المغناطيسية "مثبتة" في اتجاه معين ولا تتأثر بالحرارة، وهو أساس الذاكرات غير المتطايرة (MRAM)، و هنا تم اختيار العنصر النادر الديسبروسيوم (Dy) ويقع في منتصف النصف الأيمن تقريباً من سلسلة المعادن النادرة ($4f^{10}$) كما يظهر في الشكل (4) ويكون شكل السحابة الالكترونية مفلطحاً مما يجعل من الصعب جداً قلب مغناطيسيته.

- إجهاد عدم التوافق الشبكي (Lattice Misfit Strain):

" نمذجة الخصائص الإلكترونية والمغناطيسية لبعض المعادن الأرضية النادرة ودورها في صناعة الرقائق
المتقدمة عالية الأداء "

فهناك اختلاف بين حجم ذرات السيليكون وذرات المعادن النادرة فعند إدخال عنصر نادر بحجم ذري كبير يُسبب ذلك إجهاد في البنية البلورية تضغط فيه الذرة الداخلة على الذرات المجاورة مما يُسبب تغير قيم فجوة الطاقة للسيلكون (جهد العتبة) و التي تساوي (1.12 eV) في السيليكون النقي، و هنا ندرس معدن النيوديميوم (Nd) و الذي يقع في منتصف الجزء الأيسر من سلسلة المعادن النادرة ($4f^3$) كما يظهر في الشكل (4) حيث يكون نصف القطر الأيوني أكبر مقارنة بالعناصر الأخرى.

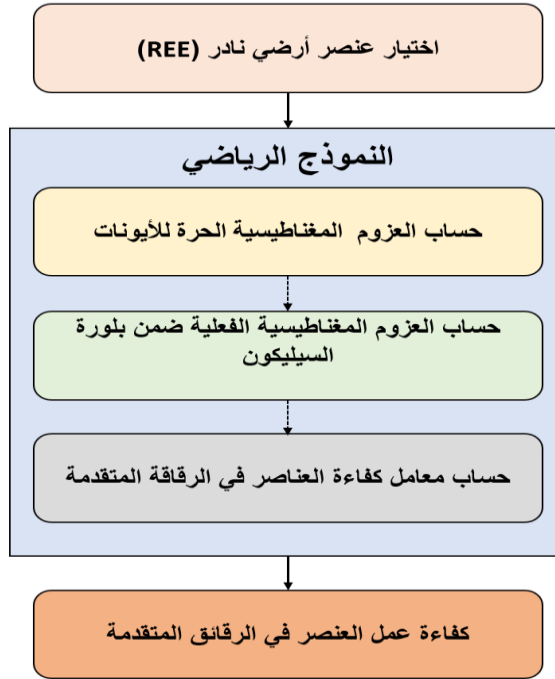
Lanthanide Series	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	138.90547	140.116	140.90768	144.242	144	150.36	151.964	157.25	158.92535	162.500	164.93033	167.259	168.93042	173.054	174.964

الشكل (4): سلسلة عناصر اللانثانيدات في الجدول الدوري للعناصر الكيميائية.

سبب اختيار العناصر الثلاثة (Gd, Dy, Nd) أنها تمثل ثلاث حالات حدية (Extreme Cases) ومتميزة في سلسلة اللانثانيدات من خلال مواقعها في السلسلة، مما يسمح بمسح شامل لتأثيرات البنية الإلكترونية على خصائص السيليكون، هذا الاختيار لا يقلل من أهمية باقي العناصر، حيث يمكن تعميم النتائج المُستخلصة منها للتنبؤ بسلوك باقي العناصر دون الحاجة لدراستها جميعاً بشكل فردي فعلى سبيل المثال يمكن التنبؤ بسلوك العنصر (Ho) والذي يملك ($4f^{11}$) أنه سيكون ذو خصائص قريبة من عنصر الديسبروسيوم (Dy) المدروس نتيجة قرابه منه.

8- النموذج الرياضي المقترح:

ينقسم النموذج المقترح إلى ثلاث مراحل مترابطة تسلسلياً كما يظهر في المخطط الصندوقي:



المرحلة الأولى (حساب العزم المغناطيسية الحرة للأيونات):

تهدف هذه المرحلة لحساب العزم المغناطيسي الحر للعناصر الأرضية النادرة المختارة (Gd, Dy, Nd) قبل إدخالها في بلورة السيليكون، حيث يمكن حسابها من خلال العلاقة الرياضية(3):

$$\mu_{\text{free}} = g \cdot \sqrt{J(J+1)} \quad (3)$$

حيث أن:

- (J) اقتران راسل-سوندرز: تحديد الزخم الزاوي الكلي بناءً على نسبة امتلاء المدار . (4F)

- (g) معامل لانديه : يمثل نسبة العزم المغناطيسي إلى الزخم الزاوي و يُحسب بالعلاقة الرياضية (4):

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (4)$$

حيث أن:

- (S) العزم المغزلي: لتقليل طاقة التناثر الكولومي بين الإلكترونات.
- (L) العزم المداري: لتقليل التداخل المداري.

نتائج المرحلة الأولى:

بتطبيق والمعادلات (3) و (4) الجدول (2):

الجدول(2): العزوم المغناطيسية للأيونات الحرة.

العنصر (Element)	(4f ⁿ)	S	L	J	g	μ_{free}
الجادولينيوم (Gd)	4f ⁷	7/2	0	7/2	2.0	7.94
الديسبروسيوم (Dy)	4f ⁹	5/2	5	15/2	1.33	10.63
النيوديميوم (Nd)	4f ³	3/2	6	9/2	0.72	3.62

المرحلة الثانية (حساب العزوم المغناطيسية الفعلية ضمن بلورة السيكون):

عند إقحام أيون عنصر المعدن النادر في بلورة السيليكون ، يخضع العزم المغناطيسي الحر لسلسلة من الاضطرابات الناتجة عن البيئة البلورية المحيطة وتفاعلات حاملات الشحنة، يتم نمذجة هذه التأثيرات عبر ثلاثة عوامل تصحيحية رئيسية هي ظواهر فيزيائية موجودة و مثبتة سيتم تحويلها لثلاث صيغ هندسية رياضية قابلة للحساب المباشر دون الحاجة لمحاكاة كمومية معقدة.

- انشطار المجال البلوري (CF – Crystal Field Splitting) :

يُعرف انشطار المجال البلوري بأنه ظاهرة كسر المدارات الإلكترونية للأيون الحر نتيجة تعرضه لمجال كهربائي ساكن غير متناظر، ناتج عن توزيع الشحنات للأيونات المجاورة في الشبكة البلورية. حيث يحدث انقسام في مستويات الطاقة الفرعية يؤدي هذا الانقسام إلى إعادة توزيع الإلكترونات في حالات طاقة جديدة، مما قد يسبب انخفاضاً في العزم المغناطيسي المداري الكلي للأيون [13] [14] .

نقترح صياغة هذه الظاهرة عبر نموذج رياضي ظاهري يُمثل بالصيغة الرياضية (5)، حيث يُفترض أن النقصان في العزم المغناطيسي يتناسب طردياً مع نسبة طاقة الاضطراب إلى طاقة الربط الأساسية، وقد تم التعبير عن هذا النقصان بالطرح من قيمة (1) المرجعية للحالة المستقرة.

$$F_{CF} = \left(\frac{\Delta_{CF}}{E_{4f}} * \alpha - 1 \right) \quad (5)$$

حيث أن :

- (Δ_{CF}) : طاقة الاضطراب الناتجة عن الانشطار.
- (E_{4f}) : قوة تماسك الإلكترون في مداره الأصلي.
- (α) : معامل انشطار المجال وتكون قيمتها (0.2).

حيث أن (α) يمثل "معامل انشطار المجال البلوري". وقد فرضنا له قيمة تقريبية تجريبية تبلغ (0.2) ويُعلل سبب أن هذه القيمة المنخفضة بالاستناد إلى تأثير الحجب الفريد الذي تتمتع به العناصر الأرضية النادرة إذ إن إلكترونات المدار (4f) محجوبة بقوة بواسطة إلكترونات المدارين (5p,5s) مما يجعل تأثيرها بالمجال البلوري الخارجي للسيليكون المضيف تأثيراً ضعيفاً ، و يعكس المعامل (0.2) هذه المقاومة الضعيفة للاضطراب.

-التهجين المداري (Hybridization) :

يُشير التهجين المداري إلى التداخل الكمومي بين الدوال الموجية للإلكترونات الموضعية في مدارات 4f للعنصر النادر، وبين إلكترونات التوصيل غير المتمركزة في مدارات (sp³) للسيليكون المضيف.

وفقاً لنموذج أندرسون للشوائب (Anderson Impurity Model)، يؤدي هذا التداخل إلى توسيع مستويات الطاقة الموضعية وتحويلها إلى "رنين (Resonance) "ذي عرض طيفي محدد . ويمثل هذا العرض احتمالية نفق الإلكترون (Tunneling Probability) من المدار الموضعي إلى نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى تقليل زمن بقاء الإلكترون في الحالة المغناطيسية، وبالتالي انخفاض القيمة المتوسطة للعزم المغناطيسي الفعّال [15] [16].

نقترح تمثيل أثر التهجين المداري من خلال الصيغة الرياضية (6)، والتي تصف احتمالية هروب الإلكترون من مداره الموضعي (4f) نحو بحر إلكترونات التوصيل في السيليكون. فكلما زادت احتمالية هذا الهروب، قلت مساهمة الإلكترون في دعم العزم المغناطيسي الموضعي الأساسي.

$$F_{hyb} = \left(\frac{E_{hyb}}{E_{4f}} * \beta - 1 \right) \quad (6)$$

حيث أن:

- (E_{hyb}) : قوة الجذب التي تسحب الإلكترون للخارج.
- (β) : معامل التهجين المداري وتكون قيمتها (0.1).

حيث أن (β) تمثل "معامل التهجين المداري". وقد افترضنا لها قيمة تمثيلية تبلغ (0.1). ويأتي لتعليل هذه القيمة المنخفضة جداً بسبب الطبيعة الموضعية العميقة لمدارات (4f) داخل ذرة العنصر النادر، إذ يكون التداخل المكاني بين الدوال الموجية لهذه المدارات العميقة ومدارات التوصيل للسليكون في حده الأدنى، مما يعني أن احتمالية النفق الكمومي وعملية تفاعل التهجين تكون ضئيلة وهامشية للغاية، وهو ما يعكسه المعامل المقترح لمعادلة الاستقرار.

-تفاعل التبادل غير المباشر (Indirect Exchange Interaction):

نظراً لأن المدارات المغناطيسية (4f) تكون عميقة ومحمية، فإن التداخل المباشر بين أيونات العناصر النادرة المتباعدة في الشبكة يكون مهماً. حيث يقوم العزم المغناطيسي للأيون الأول باستقطاب غيمة إلكترونات التوصيل المحيطة به (Spin Polarization)، وتنتقل هذه التذبذبات في كثافة العزم المغزلي (Spin Density Oscillations) عبر الشبكة لتؤثر على اتجاه العزم المغناطيسي للأيون الثاني مما يؤثر على قيمة العزم المغناطيسي [17] [18].

نقترح تمثيل تفاعل التبادل الغير مباشر بالصيغة (7) وهذا العامل يختلف عن السابقين هو عامل تعزيز وليس تقليل، لأنه يمثل الاصطفاف الجماعي للعزوم.

$$F_{ex} = \left(\frac{J_{ex} * S}{K_B * T} * \gamma + 1 \right) \quad (7)$$

حيث أن:

- $(J_{ex} * S)$: طاقة المغناطيسية تعتمد دائماً على جداء (قوة الاقتران * مقدار العزم).
- $(K_B * T)$: الطاقة الحرارية التي تحاول بعثرة العزوم المغناطيسية.
- (γ) : معامل تعزيز التبادل وتأخذ قيمة (1.5).

- كتبويج للنماذج التصحيحية الثلاثة السابقة، نقتري الصيغة العامة التجميعية التالية العلاقة (8) لاستنباط العزم المغناطيسي الفعال للعنصر النادر داخل شبكة السيليكون، وذلك كحاصل ضرب العوامل المقترحة آنفاً في قيمة العزم المغناطيسي للأيون الحر :

$$(F_{CF} * F_{hyb} * F_{ex}) * \mu_{free} = \mu_{eff} \quad (8)$$

بتطبيق المعادلات (5) و(6) و(7) و(8) على العناصر المختارة ينتج لدينا الجدول (3):

الجدول(3): العزوم المغناطيسية الفعلية للعناصر النادرة ضمن شبكة السيليكون.

العنصر	F_{CF}	F_{hyb}	F_{ex}	μ_{free}	μ_{eff}
Gd	0.99	0.99	1.28	7.94	10.1
Dy	0.97	0.99	1.18	10.63	12.05
Nd	0.976	0.988	1.05	3.62	3.66

- المرحلة الثالثة (حساب معامل كفاءة العناصر في الرقاقة المتقدمة):

في هذه المرحلة النهائية، يتم تقييم صلاحية العنصر الأرضي النادر للتطبيق في الرقائق المتقدمة بناءً على ثلاثة محاور رئيسية تشكل "مثلث الأداء":

✓ القوة المغناطيسية (μ_{eff}): تحدد قوة الإشارة وسعة تخزين البيانات.

✓ الاستقرار الحراري (T_C): تحدد نطاق تشغيل الجهاز دون تبريد.

✓ التوافق الشبكي (ϵ): يحدد سهولة التصنيع وقلة العيوب البلورية (Defects).

يتم صياغة معامل كفاءة الرقاقة (ICE) كحاصل ضرب لهذه العوامل الثلاثة (لأن فشل أي واحد منها يعني فشل الرقاقة بالكامل) كما في الصيغة (9):

$$ICE = \left(\frac{\mu_{eff}}{\mu_{Gd}}\right) * \left(\frac{T_C}{300 K}\right) * (1 - |\epsilon|) \quad (9)$$

- الحد الأول $(\frac{\mu_{eff}}{\mu_{Gd}})$ قوة الإشارة المغناطيسية :

حيث أن:

- (μ_{eff}) : العزم المغناطيسي الفعال للعنصر النادر.
- (μ_{Gd}) : العزم المغناطيسي لعنصر الجادولينيوم.

الظاهرة الفيزيائية: في رقائق الذاكرة (MRAM) أو المعالجات المنطقية تعتمد دقة القراءة والكتابة على "نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)" كلما كان العزم المغناطيسي للأيون (μ_{eff}) أكبر، كانت الإشارة أوضح وأقوى، مما يقلل من أخطاء البيانات.

رياضياً: إذا كانت (النسبة < 1) : العنصر ممتاز و الإشارة قوية في حين إذا كانت (النسبة > 0.5) : العنصر ضعيف و الإشارة مشوشة.

ملاحظة: في مقام النسبة لا بدّ من وضع عنصر ذو عزم مغناطيسي فعال قوي ومستقر كعنصر مرجعي و هذا ما يتحقق في العنصر (Gd).

- الحد الثاني $(\frac{T_C}{300k})$ الاستقرار الحراري:

حيث أن:

- (T_C) : درجة حرارة كوري للعنصر الأرضي النادر.
- $(300k)$: درجة حرارة الغرفة التشغيلية.

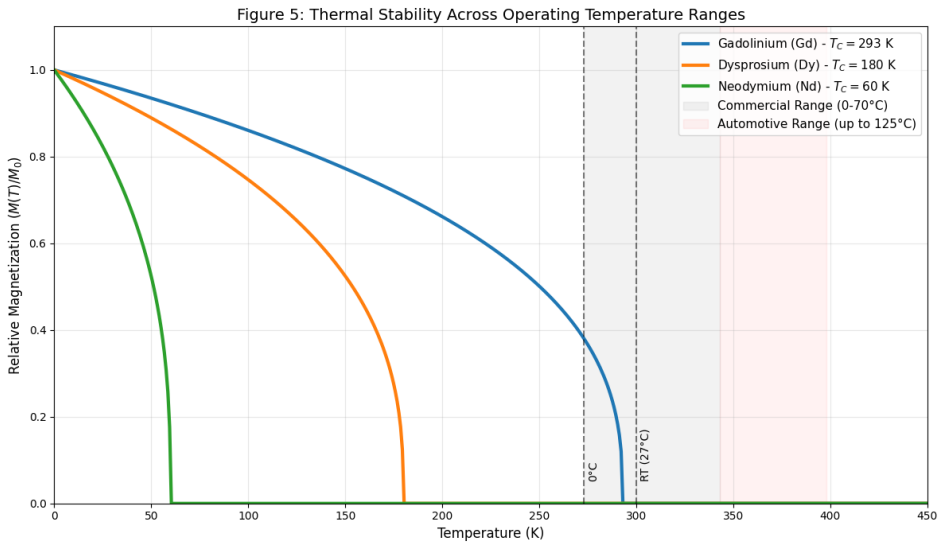
الظاهرة الفيزيائية: المغناطيسية هي ظاهرة تعاونية تنهار بفعل الاهتزازات الحرارية، لكي تعمل الرقاقة يجب أن تكون الطاقة المغناطيسية أكبر من الطاقة الحرارية للبيئة .

رياضياً: إذا كانت (النسبة < 1) المادة مغناطيسية و مستقرة في حين إذا كانت (النسبة > 1) المادة بارامغناطيسية و غير مستقرة.

ملاحظة: درجة حرارة كوري (T_C) هي نقطة التحول الحرجة بين حالتين للمادة، فعندما تكون تحت (T_C) تكون حالتها "فيرومغناطيسية (Ferromagnetic)" العزوم المغناطيسية للذرات مصطفة بانتظام (مثل الجنود)، ولها مغناطيسية قوية ودائمة، في حين عندما تكون فوق (T_C)

تكون حالتها "بارامغناطيسية (Paramagnetic) " الحرارة تتغلب على قوى الترتيب، وتصبح العزوم عشوائية تماماً و المغناطيسية تختفي.

بالاعتماد على هذا الحد يمكن دراسة الاستقرار الحراري للعناصر الارضية النادرة بناءً على تغير درجات حرارة التشغيل للرقائق النادرة في ظروف العمل المختلفة (تجاري، مصانع، سيارات، عسكري و غيرها) و الذي يمكن تحديده من (200k ~ 400k) حيث يمكن رصد تغير قيمة المغناطيسية الفعلية للعنصر مع تغير درجة حرارة التشغيل للرقاقة كما يظهر في الشكل(5):



الشكل(5):تغير قيمة المغناطيسية الفعلية للعنصر مع تغير درجة حرارة التشغيل للرقاقة

حيث يظهر الشكل (5) التالي:

تفوق عنصر (Gd) على عنصري (Dy) و (Nd) اللذان لا يصلحان في العمل بالظروف التشغيلية للرقائق المتقدمة.

بالمجمل نلاحظ عجز في فعالية المغناطيسية للعناصر النادرة في الظروف التشغيلية للعناصر النادرة وهذا يفسر لنا استخدام المبردات السائلة في الحواسيب الكمومية التي تعتمد في بنيتها على المعادن النادرة و كذلك استخدام مبدأ التهجين للعناصر النادرة مع المواد الانتقالية مثل (Gd-

(Fe-Co) للحصول على سبائك ذات معامل درجة كوري عالي يسمح باستقرار حراري للمغناطيسية في الظروف التشغيلية لعمل الرقائق المتقدمة.

-الحد الثالث ($1 - |\epsilon|$) التكامل الهيكلي :

حيث أن :

- (ϵ) : قيمة الانفعال المرتبطة التي ترتبط بالفرق بين نصف قطر ذرة العنصر الارضي النادر و نصف قطر ذرة السيليكون.

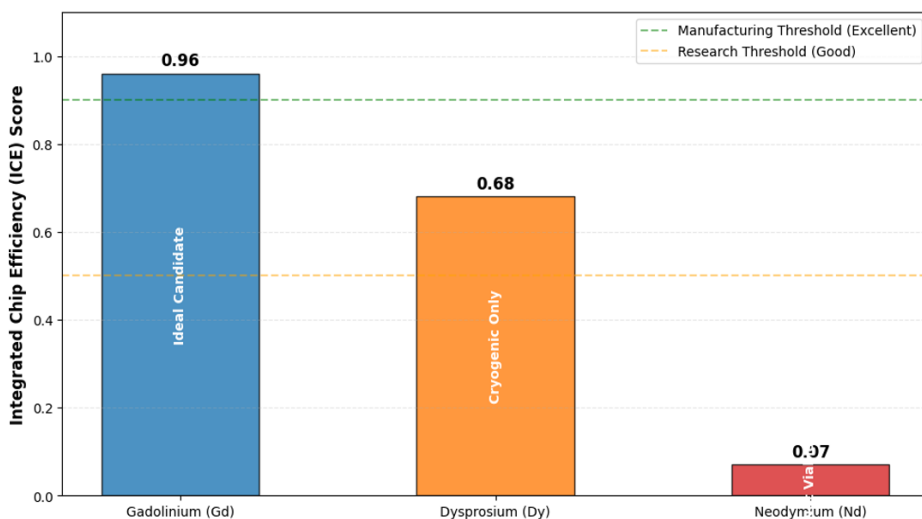
ملاحظة: إذا كان ($\epsilon < 0$) : يعني أن الأيون الدخيل أصغر من ذرة السيليكون التي يحل محلها و هذا يسبب "إجهاد شد" وبالمقابل اذا كان ($\epsilon > 0$) عني أن الأيون الدخيل أكبر من ذرة السيليكون و هذا يسبب "إجهاد ضغط" .

الظاهرة الفيزيائية: إدخال ذرة غريبة (REE) في شبكة السيليكون يسبب "إجهاداً ميكانيكياً". رياضياً: اذا كانت قيمة ($\epsilon = 0$) يعني تطابق تام و جودة ممتازة، و اذا زادت القيمة تقل الجودة حيث يعكس هذا الحد "قابلية التصنيع (Manufacturability)" لا فائدة من مادة مغناطيسية قوية إذا كانت تدمر بلورة السيليكون وتجعل الرقاقة غير قابلة للعمل كهربائياً. بتطبيق المعادلة (9) نحصل على الجدول(4):

الجدول(4): نتائج تطبيق معادلة الكفاءة للرقائق المتقدمة.

العنصر	قوة الإشارة المغناطيسية	الاستقرار الحراري	التكامل الهيكلي	النتيجة النهائية	التقييم النهائي
الجادولينيوم (Gd)	1.00	0.98	0.98	0.96	كفاءة شبه مثالية (صالح لتصنيع الرقائق المتقدمة)

الديسبروسيوم (Dy)	1.19	0.60	0.96	0.68	جيد ولكن محدود (يخسر بسبب الحرارة)
النيوديميوم (Nd)	0.36	0.20	0.99	0.07	أداء ضعيف جداً (غير صالح لتصنيع الرقائق المتقدمة)



الشكل (6): المقارنة بين نسب كفاءة العناصر الأرضية المختارة في تصنيع الرقائق المتقدمة.

ملاحظة : تمثل العتبة الفاصلة في المخطط أعلاه عتبة الجدوى الصناعية الآمنة المقترحة في هذا البحث. ونظراً لأن استنتاج قيمة (ICE) يعتمد على عملية الضرب التراكمي للمحاور الثلاثة، فإن هذه العتبة وُضعت هندسياً لضمان أن العنصر المرشح لا يعاني من قصور شديد في أي محور أساسي. فعلى سبيل المثال، سقوط تقييم عنصر تحت هذه العتبة (مثل الديسبروسيوم) لا يعني انعدام فوائده، بل يعني أنه يتطلب بيئات تشغيلية شديدة التقييد (كالتبريد المستمر) مما يُسقطه من سباق تصنيع الرقائق المتقدمة التجارية للعمل في درجات حرارة الغرفة.

يُوضح الشكل (6): كفاءة عنصر (Gd) في تصنيع الرقائق المتقدمة بالمقارنة مع باقي العناصر (Dy) و (Nd) وذلك لتفوقه المغناطيسي واستقراره الحراري واندماجه المثالي ضمن بلورة السيليكون. يُلاحظ أيضاً على الرغم من العزم المغناطيسي العالي لعنصر (Dy) في حالته الحرة إلا أن ذلك لم يمنحه تفوق نظراً لضجيج الحراري الذي يعنيه و يؤثر على عزمه عند العمل بدرجة حرارة الغرفة.

يُلاحظ أيضاً على الرغم من التكامل الهيكلي المثالي لعنصر (Nd) ضمن بلورة السيليكون لكن ذلك لم يمنحه أيضاً تفوقاً نظراً لانحدار عزمه المغناطيسي بشدة كبيرة عند عمله بدرجة حرارة الغرفة وهذا ما ظهر جلياً بمستوى استقراره الحراري الهش.

بالمجمل لا يعني تفوق عنصر من العناصر الأرضية النادرة في أحد العوامل مثاليته في تصنيع الرقاقة الإلكترونية المتقدمة لكن يجب أن يكون أداءه مقبول في جميع العوامل المؤثرة في الأداء العالي لعمل الرقائق المتقدمة وهذا ما دفعنا إلى استخدام عملية الضرب بين الحدود الثلاثة لعلاقة (ICE) بدلاً من الجمع ليكون الاشرط متزامناً بين العوامل الثلاثة ففشل إحداها يعني فشل العنصر عن تحقيق الاداء المطلوب في بناء الرقاقة المتقدمة ذات الأداء العالي.

9- الاستنتاجات:

خلص البحث من خلال النمذجة التحليلية للعناصر الأرضية النادرة (Gd, Dy, Nd) داخل السيليكون إلى ما يلي:

1. أفضلية الجادولينيوم (Gd) : أثبت النموذج تفوق عنصر الجادولينيوم كخيار أمثل لتصنيع الرقائق المتقدمة، محققاً أعلى معامل كفاءة ($ICT=0.96$) بفضل توازنه المثالي بين العزم المغناطيسي والاستقرار الحراري عند درجة حرارة الغرفة.

2. محدودية الديسبروسيوم (Dy) : رغم امتلاكه لأعلى عزم مغناطيسي، إلا أن انخفاض استقراره الحراري ($T_c = 180k$) يجعله غير صالح للتطبيقات التجارية دون تبريد، مما يحصر استخدامه في البيئات المبردة فقط.
3. استبعاد النيوديميوم (Nd) : أظهرت النتائج عدم صلاحية النيوديميوم لتطبيقات "السينترونيك" المتقدمة بسبب ضعف عزمه المغناطيسي وانهيائه الحراري المبكر ($T_c = 60k$).

4. فعالية نموذج (ICE) : نجح "معامل كفاءة الرقاقة المتكامل" المقترح في توفير أداة تنبؤية دقيقة للمفاضلة الهندسية بين العناصر قبل التصنيع، مما يقلل التكلفة والوقت.

10- التوصيات و الآفاق المستقبلية:

بناءً على نتائج النمذجة والتحليل، يوصي البحث بالآتي:

1. اعتماد استراتيجية التطعيم الهجين : التوجه نحو دراسة تأثير إضافة عناصر انتقالية (مثل الحديد(Fe) أو الكوبالت(Co) إلى مصفوفة السيليكون المدعمة بالجادولينيوم (Gd)، لرفع درجة حرارة كوري ($T_c > 400k$) وضمان العمل في البيئات القاسية.
2. التحقق التجريبي للنموذج (ICE) : إجراء تجارب تصنيع فعلية لرقائق اختبارية (Test Chips) باستخدام تقنيات الفذف الجزئي (MBE) لقياس الأداء ومقارنته بالقيم النظرية التي تنبأ بها نموذج كفاءة الرقاقة المتكامل.
3. توسيع نطاق النمذجة : تطبيق النموذج المقترح على عناصر أرضية نادرة أخرى مثل التيربيوم(Tb) والهولميوم(Ho) لاستكشاف إمكانية وجود بدائل أو مكملات للجادولينيوم في تطبيقات محددة.
4. دراسة تأثيرات الكم (Quantum Effects) : التعمق في دراسة تأثير التفاعلات الكمومية الدقيقة عند الأبعاد النانوية المتناهية الصغر حيث قد تظهر سلوكيات مغناطيسية جديدة غير متوقعة

المراجع:

1. M. Onal, S. Smith, and K. Johnson, "Recycling of NdFeB Magnets using Sulfation, Selective Roasting, and Water Leaching," *Metals*, Vol. 11, No. 1296, (2021).
2. H. Akbari et al., "First-principles calculations of magnetic properties for analysis of magnetization processes in rare-earth permanent magnets," *Scripta Materialia*, Vol. 146, pp. 260–264, (2018).
3. S. S. A. Gillani et al., "Consequences of tuning Rare Earth (RE^{+3}) site and Exchange Correlation Energy (U) on the Optoelectronic, Mechanical and Magnetic properties," *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 138, (2022).
4. M. T. Silva et al., "Rare-Earth Metal Oxides in Electrochemical Sensors," *Sensors*, Vol. 21, No. 5615, (2021).
5. L. Li et al., "Microstructure and Magnetic Properties of Sintered Nd-Fe-B Magnets," *Materials*, Vol. 15, No. 201, (2022).
6. R. S. Sheridan et al., "Anisotropic Powder Processed Nd-Fe-B Magnets with Nd-Cu and Tb-Cu Grain Boundary Diffusion," *Metals*, Vol. 12, No. 794, (2022).
7. X. Liu et al., "Corrosion Resistance of Rare Earth Modified Coatings," *Coatings*, Vol. 14, No. 139, (2024).
8. J. Zhang et al., "Recent Advances in Rare Earth-Based Nanomaterials for Tumor Therapy," *Nanomaterials*, Vol. 12, No. 1773, (2022).

9. Y. Wang et al., "Synthesis and Properties of Rare Earth Complexes," *Molecules*, Vol. 29, No. 688, (2024).
10. Connelly, N. G., Damhus, T., Hartshorn, R. M., & Hutton, A. T. (Eds.). (2005). *Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations 2005*. Royal Society of Chemistry.
11. Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press. ISBN: 978-0-415-33340-5.
12. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-7506-3365-9.
13. Kittel, C. (2005). Introduction to Solid State Physics. 8th Ed., Wiley. (Chapter 14: Magnetic Properties).
14. Lea, K. R., Leask, M. J. M., & Wolf, W. P. (1962). "The raising of angular momentum degeneracy of f-electron terms by cubic crystal fields". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 23(10), 1381-1405.
15. Anderson, P. W. (1961). "Localized Magnetic States in Metals". *Physical Review*, 124(1), 41-53.
16. Coey, J. M. D. (2010). Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge University Press. (Section 4.2: Localized Moments).
17. Ruderman, M. A., & Kittel, C. (1954). "Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic Moments by Conduction Electrons". *Physical Review*, 96(1), 99-102.

18. Dietl, T., et al. (2000). "Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors". Science, 287(5455), 1019-1022.