

نمذجة حساس مغناطيسي باستخدام تقنية GMR

م. رنيم الابراهيم*

(تاريخ الإيداع 2021/ 12/ 15 . قبل للنشر في 2022/ 3/ 27)

□ ملخص □

منذ تطور ميكانيك الكم أخذت التكنولوجيا طريقها في التطوير والتصغير وزناً وحجماً، أصبح حجم الرقاقات من رتبة 100 نانومتر وأقل، أدى ذلك إلى امتلاكها ميزات فريدة (صغر الحجم، انخفاض استهلاك الطاقة).

يوجد عدة خصائص لميكانيك الكم، أحد هذه الخصائص هي عزم الدوران الذاتي للإلكترون المعروف باسم الدوران spin، والذي يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالمغناطيسية. تشكل الأجهزة التي تعتمد على عزم الدوران الذاتي للإلكترون لأداء وظائفها أساس مفهوم الإلكترونيات الدورانية Spintronics.

تضمن هذا البحث دراسة عن كيفية إيجاد البيئة الحاسوبية المناسبة لمواكبة التطور والإنجازات التي قام بها العلماء ضمن هذا المجال وذلك من خلال إيجاد النموذج الكهربائي لحساس مغناطيسي باستخدام إحدى تقنيات spintronics حيث تم اعتماد تقنية GMR (Giant Magnetic Resistor) ومحاكاة النموذج باستخدام برنامجين Pspice و Orcad.

الكلمات المفتاحية: spintronics، حساسات MR، GMR، نموذج MOTT، برنامج PSPICE.

* مهندسة - ماجستير في هندسة تكنولوجيا الإلكترونيات - قسم النظم الحاسوبية والإلكترونية - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا.

Magnetic sensor modeling and using GMR technique

Eng.Ranim Alibrahim*

(Received 15/ 12/ 2021 . Accepted 27 / 3/ 2022)

□ ABSTRACT □

Since the development of quantum mechanics, technology has taken its way to develop and reduce in weight and size. The chips smaller than 100 nanometers and less in size and having unique features (smaller size, reduce power consuming).

There are many of quantum mechanics properties, one of these properties is spin, which is closely related to magnetism. Devices that rely on spin to perform its functions are the basis of the Spintronics concept .This research includes a study on how to find the appropriate computing environment to keep pace with the evolution and achievements of scientists in this field by finding the electrical and mathematical models of a magnetic sensor using a spintronics techniques where the Giant Magnetic Resistor (GMR) has been selected and model simulation were adopted using Pspice and Orcad.

Key Words: spintronics, MR sensor, GMR, Mott model, and pspice Tool.

*Engineer-Master in electronics technology engineering-Computer and electronic systems engineering department-Information and communication technology engineering college-Tartous university-Syria.

1- مقدمة:

اعتمدت تقنية معالجة المعلومات في الأجهزة الإلكترونية التقليدية على شحنة الإلكترونات، متجاهلة عزوم الدوران الذاتية لها، ثم ظهر فرع جديد في الإلكترونيات يسمى Spintronics وهو باختصار Spin -Based-Electronics، تعتمد فيه تقنية معالجة المعلومات وتخزينها ونقلها على عزوم الدوران الذاتية للإلكترونات التي تسمى بالدوران spin بالإضافة إلى شحنتها. تعمل جميع أجهزة spintronic وفقاً لما يلي:

- (1) يتم تخزين (كتابة) المعلومات في اتجاه معين لعزوم الدوران الذاتية للإلكترونات (للأعلى spin up يعبر عن الواحد منطقي وللأسفل spin down يعبر عن الصفر المنطقي).
- (2) عزوم الدوران الذاتية مرتبطة بحركة الإلكترونات التي تحمل المعلومات على طول السلك.
- (3) تتم قراءة المعلومات في طرفية خاصة. [1]

يستمر تغيير اتجاه إلكترونات التوصيل لفترة طويلة نسبياً وذلك تبعاً لعزومها الذاتية و لاتجاه مغنطة الطبقات التي تمر عبرها. يتم التحكم باستقطاب الدوران إما عن طريق الطبقات المغناطيسية أو عن طريق تفاعل التبادل ما بين العزم الذاتي للإلكترون ومداره spin-orbit coupling [13]. تعد أجهزة spintronic مناسبة لصناعة الذواكر وتطبيقات الحساسات المغناطيسية، للحوسبة الكمومية حيث عزوم الدوران الذاتية للإلكترونات تمثل تراكب (qubit) من المعلومات أي تراكب (1) مع (0) الممثلان لاتجاه عزوم الدوران الذاتية.

مبدأ عمل جهاز spintronic، يعتمد على وجود نظام يمكنه توليد تيار من الإلكترونات المستقطبة، ونظام حساس لاستقطاب الدوران للإلكترونات. من أجل تأمين توليد التيار المستقطب فإنه يمكن حقن التيار من خلال مادة مغناطيسية [2].

الأجهزة التي يتضمنها البحث هي حساسات spintronic التي تعتمد على تأثير MR حيث تمثل (Magnetic Resistor) MR المقاومة المغناطيسية، تقوم بتحويل المجال المغناطيسي المطبق عليها إلى تغير في الجهد أو المقاومة. طوّرت عدة تقنيات لتحسين أداء حساسات MR وهي:

AMR (Anisotropic Magnetic Resistor) المقاومة المغناطيسية المتباينة

GMR (Giant Magnetic Resistor) المقاومة المغناطيسية العملاقة

TMR (Tunneling Magnetic Resistor) المقاومة المغناطيسية النفقية

الاختلاف بين هذه التقنيات هو نسبة MR أي مقدار تغير المقاومة الذي كلما كان كبير كلما كان الحساس أفضل ويمكن استثماره بالتطبيقات بشكل أفضل. [3]

تم ضمن هذا البحث استخدام تقنية GMR، التي تم اكتشافها عام 1980 من قبل عالمين أوروبيين. [3]

وصل نسبة التغيير في المقاومة MR لهذه التقنية 6-20% (مقارنة مع 5% لتقنية AMR)، وهذا مناسب لتصميم حساس مغناطيسي. تتميز الحساسات التي تعتمد تقنية GMR بعدة مزايا من ناحية صغر الحجم واستهلاك الطاقة والحساسية و القدرة على كشف الحقول المغناطيسية لكنها مكلفة أكثر مقارنة مع الحساسات القديمة التي تعتمد على أثر هول hall effect [3].

2- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى:

- بناء النموذج الكهربائي للحساس المغناطيسي وفق تقنية GMR.
- استثمار النموذج بإحدى التطبيقات الآتية:
 - ✓ حساسات رؤوس القراءة والكتابة.
 - ✓ حساسات التيار.
 - ✓ الحساسات الحيوية.
- محاكاة النموذج الكهربائي باستخدام PSPICE.
- مناقشة النتائج ومقارنتها.

3- أهمية البحث:

تعود أهمية البحث إلى أهمية أجهزة Spintronics حيث تتميز بالخصائص الآتية:

- انخفاض استهلاك الطاقة و أقل تبديد للحرارة.
- يأخذ مساحة أقل على الرقاقة، وبالتالي أكثر قابلية للتصغير .
- معالجة الدوران أسرع، لذلك فإن عمليات القراءة والكتابة ستكون أسرع ويمكن استغلال هذه الميزة في تصميم الدواكر.
- لا يتطلب هذا النوع من الأجهزة أنصاف النواقل متخصصة مثل السيلكون والجرمانيوم، إنما تتطلب المعادن الشائعة الاستعمال مثل الحديد، الألمنيوم.[4]

4 - طرائق و أدوات البحث:

أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسات ومراجع علمية حديثة تختص في هذا المجال وقد أخذت نتائجها وتوصياتها بعين الاعتبار. حيث تمت نمذجة الحساس باستخدام المحاكى pspice وفق الخطوات الآتية:

- فهم آلية عمل الحساسات المغناطيسية.
- دراسة أثر GMR.
- تحديد الكمية الفيزيائية المراد تحسسها وتم اختيار التيار في هذا البحث.
- بناء النموذج الكهربائي للحساس بالاعتماد على GMR.
- محاكاة النموذج باستخدام لغة PSPICE وبيئة Orcad.

1-4 تصميم النظام :

1-1-4 الحساسات المغناطيسية:

تقوم الحساسات بشكل عام بقياس الظواهر الفيزيائية مثل درجة الحرارة أو الضغط، وتحول الكمية المقاسة إلى إشارة كهربائية التي تستخدم لاحقاً في تطبيقات معينة.

يقوم الحساس المغناطيسي بقياس التغيير في شدة الحقل المغناطيسي الناتج عن الحركة أو الدوران أو التيار الكهربائي ويحوّله إلى إشارة كهربائية كما موضح في الشكل (1):



الشكل (1) مخطط توضيحي لعمل الحساس المغناطيسي

من خلال ما سبق يمكن القول أن الحساسات المغناطيسية تعتبر من أفضل الحساسات و ذلك للأسباب

الآتية:

1. عملية القياس تتم من خلال قياس التغيرات في الحقل المغناطيسي دون أن تكون على تواصل مباشر مع المقادير الفيزيائية التي سببت هذا التغيير.
 2. الخرج موثوق و دقيق.
 3. العمل ضمن ظروف العمل غير المناسبة مثلا رطوبة، درجات حرارة مرتفعة...الخ.
 4. سهولة التصنيع و منخفضة التكلفة.
- وتعتبر عملية قياس السرعة و الموضع والتيار من أهم التطبيقات التي يمكن الاعتماد فيها على الحساسات المغناطيسية. [5].

4-1-1 أنواع الحساسات المغناطيسية:

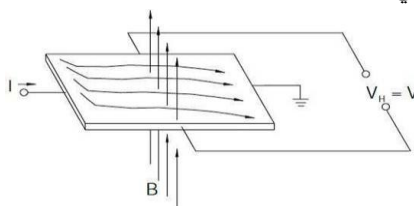
يوجد عدة أنواع للحساسات المغناطيسية نذكر منها:

(1) الحساس المغناطيسي البسيط: ينتج عن لف سلك حول مادة مغناطيسية حديدية، يتغير التدفق عبر الملف إذا كان الملف يدور في مجال مغناطيسي غير متجانس. التغيير في جهد خرج الحساس يتناسب مع تغير التدفق المغناطيسي الذي تم تحسسه من قبل الملف. هذا النوع يعاني من الكثير من المشاكل وغير مناسب لكثير من التطبيقات.

(2) حساسات أثر هول Hall effect كثيرة الاستخدام وتعتمد على أثر هول، ويمكن توضيح

أثر هول على النحو الآتي: [6]

لدينا لوحة رقيقة يمر عبرها تيار كهربائي، يحدث انخفاض في الجهد عندما يكون التيار الكهربائي عمودي على الحقل المغناطيسي (الحقل المغناطيسي عمودي على اللوحة).
عندما يتحرك الالكترون على طول المجال المغناطيسي، تظهر قوة لورنز وتكون عمودية على اتجاه حركة الالكترون وعلى الحقل المغناطيسي.



الشكل (2) حساس أثر هول

من أجل معدن بسيط ، يعطى انخفاض الجهد بالمعادلة الآتية [6] :

$$V_{hall} = - \frac{I * B}{n * e * d} \quad (1)$$

حيث B هو المجال المغناطيسي ، I هو التيار المار في الشريحة ، d هو سمك الموصل، e هي شحنة الإلكترون ، n هي كثافة الشحنات الحرة. تعطى قوة لورنيز بالعلاقة الآتية:

$$F = q(E + v * B) \quad (2)$$

حيث F تمثل قوة لورنيز (نيوتن)، E، ترمز للمجال الكهربائي(فولت لكل متر)، B ترمز للمجال المغناطيسي(تسلا) ، q، الشحنة الكهربائية للجسيم (كولون)، v، ترمز للسرعة الخطية للجسيم (ثانية لكل متر).

3 حساسات MR :

يتم تعريف ظاهرة المقاومة المغناطيسية (MR: Magneto Resistance) على أنها تغير في المقاومة الكهربائية (R) لمادة استجابةً للحقل المغناطيسي المطبق خارجياً (H) ، تعرف رياضياً كالآتي [7]:

$$MR = [R (H) - R (0)] / (R (0)) \dots \dots \dots (3)$$

حيث R(H) و R(0) هي مقاومة المواد في حال وجود مجال مغناطيسي مطبق و عدم وجوده على التوالي ، تنشأ المقاومة الكهربائية في المواد بسبب عمليات تبعثر الإلكترونات مثل تبعثر الإلكترون - الفوتون ، تبعثر الإلكترون -الإلكترون ، تبعثر الإلكترون - الشوائب الخ.

في بلورة حقيقية، تكون الذرات غير ثابتة في الوضع الشبكي المثالي، ولكن دائماً تهتز حول موقع توازنها بسبب الطاقة الحرارية، وعندما تمر الإلكترونات بهذه الذرات الهزأة، فإنها تتبعثر وتسهم في زيادة المقاومة الكهربائية. من المستحيل الحصول على بلورة خالية تماماً من العيوب أو الشوائب، لذلك أثناء التدفق تتبعثر الإلكترونات أثناء مرورها بهذه الشوائب أو العيوب.

عندما تتعرض مادة طبيعية لمجال مغناطيسي خارجي (B)، تتأثر مسارات الإلكترونات داخل المادة وتتبع حركة حلزونية بسبب قوة لورينتز [q (v × B)]، حيث q هو الشحنة و v هي السرعة، مما يؤدي إلى زيادة في احتمال التبعثر. عادةً ما تعطي هذه العملية مقاومة مغناطيسية عادية صغيرة (OMR) قدرها 1% و تختلف باختلاف B.

في عام 1857، اكتشف دبليو طومسون (اللورد كلفن) ظاهرة جديدة عندما كان يقيس مقاومة الحديد والنيكل في وجود مجال مغناطيسي [7]. كتب "...: وجدت أن الحديد ، عندما يتعرض للقوة المغناطيسية، يكتسب زيادة في المقاومة لتوصيل الكهرباء عبره، وتتناقص مقاومة توصيل الكهرباء عبر خطوط المغنطة."

وجد زيادة بنسبة 0.2% في مقاومة الحديد عندما تم تطبيق الحقل المغناطيسي طولياً ونقصاً في المقاومة بنسبة 0.4% عند تطبيق الحقل في الاتجاه العرضي. وتعرف هذه الظاهرة باسم المقاومة المغناطيسية المتباينة (AMR) Anisotropic Magnetic Resistor، تنشأ عن تفاعل spin-orbit وتعتمد على الاتجاه النسبي للتيار الكهربائي والتمغظ.

وجد في وقت لاحق أنه في درجة حرارة الغرفة، يمكن أن تكون AMR في السبائك السائبة من Ni-Fe و Ni- Co من 3 إلى 5% [7].

تم استخدام أغشية رقيقة من AMR لتأثيرات المقاومة المغناطيسية للأجهزة في الاتصال بين رؤوس قراءة الأقراص المغناطيسية وأجهزة استشعار المجال المغناطيسي. وظلت AMR لمدة 151 عامًا المصدر الرئيسي للمقاومة

المغناطيسية في المغناطيسات الحديدية حتى عام 1988، ولم يكن هناك أي تحسن في أداء مادة المقاومة المغناطيسية مع مرور الوقت.

4-1-2 تقنية GMR:

في عام 1988، كان هناك طفرة في مجال المقاومة المغناطيسية حيث اكتشفت مجموعة فيريت Ferrit أن تطبيق المجال المغناطيسي على بنية متعدد الطبقات مكونة من المواد Fe / Cr / Fe يؤدي إلى انخفاض كبير في المقاومة الكهربائية، والتي وجد أنها أعلى بكثير من (ordinary magnetic resistance) OMR و AMR وأطلق عليها اسم المقاومة المغناطيسية العملاقة GMR. [8]

تم اكتشاف تأثير مماثل لتغيير المقاومة بشكل كبير في البنية السابقة نفسها من قبل العالم Grünberg. [9]

كل من التقنيات المذكورة أعلاه تطورت من خلال تقنية Molecular Beam Epitaxy (MBE) (شعاع التبخيد الجزئي) التي تتضمن ترسيب الأغشية الرقيقة وبالتالي يتشكل لدينا نظام طبقي والذي يكون مختلفاً تماماً في خصائصه عن المواد السائبة.

وكما هو الحال مع التقنيات الأخرى (OMR, AMR)، فإن GMR هو أيضاً تغيير في المقاومة الكهربائية استجابة للحقل المغناطيسي المطبق خارجياً، وهو تأثير ميكانيكي كمومي يستند على ظواهر التبعثر التي تعتمد على الدوران في الطبقات المتعددة المغناطيسية. يحدث التغيير في مقاومة الطبقات المتعددة عند محاذاة المجال المغناطيسي المطبق مع العزوم المغناطيسية (المغطة) ومع الطبقات المغناطيسية المتعاقبة كما هو موضح في الشكل (3).

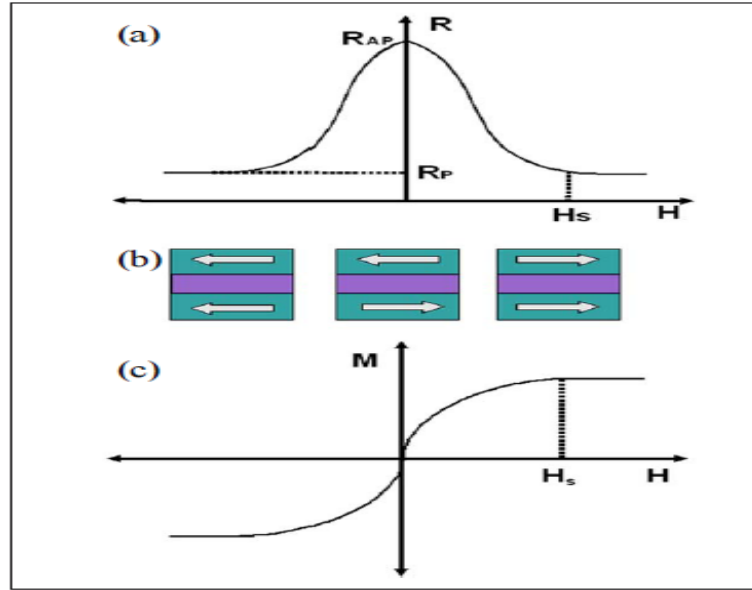
في غياب المجال المغناطيسي المطبق، لا تكون العزوم المغناطيسية للطبقات المغناطيسية باتجاه واحد، أي مغناطيساتها هي مضادة لبعضها البعض، وتؤدي إلى مقاومة أعلى.

عند تطبيق المجال المغناطيسي، تصبح العزوم المغناطيسية للطبقات المغناطيسية باتجاه واحد، أي تكون مغناطيساتها متوازية مع بعضها البعض، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة الطبقات المتعددة.

نعبر عن المقاومة المغناطيسية العملاقة بالعلاقة الآتية :

$$GMR = (R_{AP} - R_P) / R_P \quad (4)$$

حيث R_{AP} و R_P هما المقاومة في الحالات المتوازية وغير المتوازية كما هو موضح في الشكل (3) [9].



الشكل (3) تمثيل تخطيطي لتأثير GMR

• يمثل الشكل (a-3) التغيير في مقاومة الطبقات المغناطيسية المتعددة كدالة في المجال المغناطيسي المطبق.
 • يمثل الشكل (b-3) اتجاه المغنطة (المشار إليه بواسطة الأسهم) ضمن الطبقات المتعددة (الطبقات الثلاثية) في مختلف المجالات المغناطيسية.

• يمثل الشكل (c-3) منحنى M-H للطبقة المتعددة، حيث M تمثل مغنطة الطبقات و H تمثل الحقل المغناطيسي الخارجي و H_s تمثل حقل الإشباع.

يتم اقتران الطبقات البينية بواسطة الإلكترونات المتحركة في طبقة الفاصل غير المغناطيسية مثل Cr. ليس اقتران الطبقة البينية المغناطيسية هو الطريقة الوحيدة لتحقيق GMR، هناك طرق أخرى لتحقيق ذلك من خلال إدخال طبقات مغناطيسية بعمليات قسرية مختلفة (حقول قسرية). بمجرد أن يتقاطع المجال المغناطيسي المطبق مع الحقل القسري (H_c) للطبقة الحديدية المغناطيسية الصلبة، تتم محاذاة الطبقات في حالة موازية و يؤدي ذلك إلى مقاومة منخفضة.

هناك طريقة أخرى لتغيير محاذاة الطبقات المغناطيسية الحديدية هي ضبط الحقل القسري إلى قيمة أعلى وهذا ممكن عندما يتم تثبيت طبقة مغناطيسية واحدة بواسطة اقتران بطبقة متجاورة ذات مغناطيسية مغايرة (بنية صمام الدوران spin valve). [9]

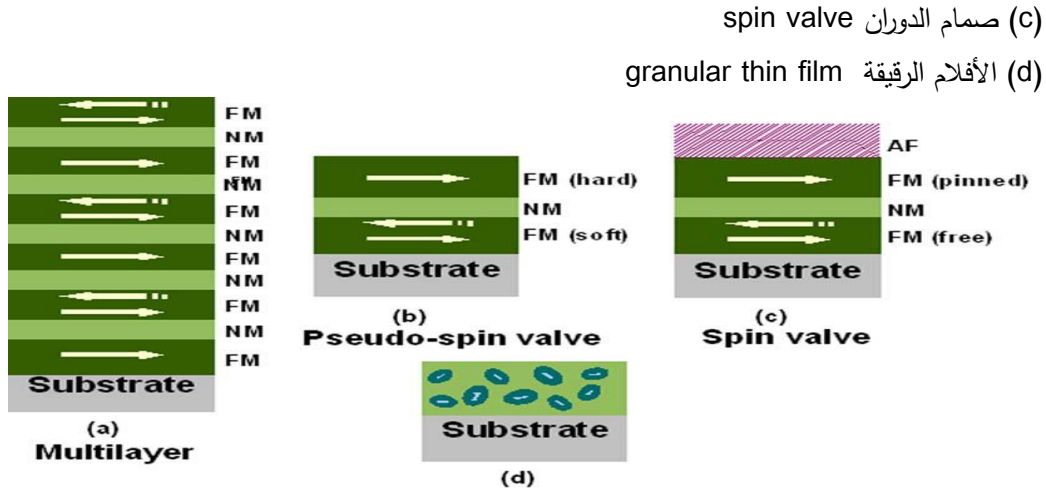
على الرغم من أن قيمة GMR في الطبقات المتعددة المغناطيسية أعلى، فإن صمامات الدوران تكون مرغوبة أكثر بسبب المجال المغناطيسي الصغير المطلوب لتغيير مقاومة هذه البنية.

الأنظمة الحبيبية المغناطيسية هي أيضا مرشحات مثالية من وجهة نظر GMR، في هذه المواد يتم تضمين رواسب مغناطيسية في طبقة معدنية غير مغناطيسية. تصبح العزوم المغناطيسية للرواسب متوازية مع بعضها البعض عند تطبيق أي مجال مغناطيسي الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض في قيمة المقاومة.

تم تطوير عدة بنى مختلفة من GMR موضحة بالشكل (4) أهمها [9] :

(a) متعدد الطبقات Multilayer

(b) صمام الدوران شبه الدائري Pseudo-spin valve



Granular thin film

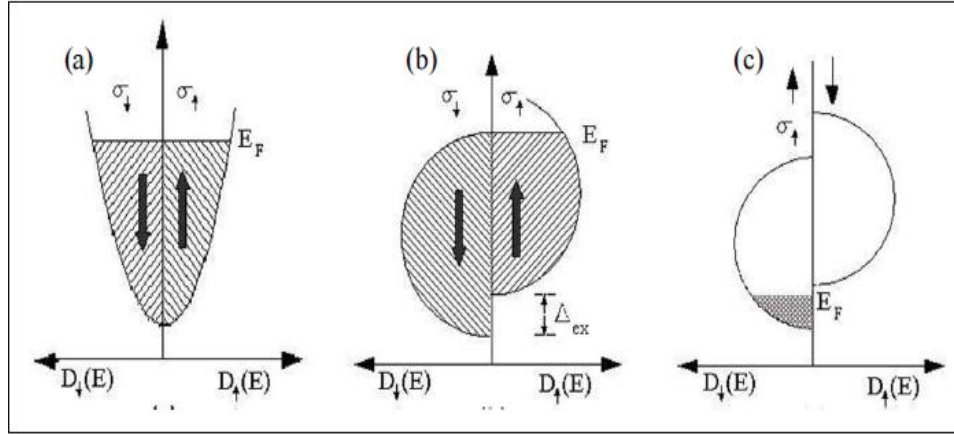
الشكل (4) بني GMR المختلفة

- يمثل الشكل (a-4) بنية الطبقات المتعددة Multilayer: يتم فصل الطبقات المغناطيسية (FM) بطبقات مصنوعة من مادة غير مغناطيسية (NM) non-magnetism. في حال انعدام الحقل المغناطيسي تكون العزوم المغناطيسية الممثلة بأسهم عريضة غير متوازية فيما بينها، و في حالة وصول قيمة الحقل المغناطيسي إلى حالة الإشباع أو ما يسمى حقل التشبع تكون العزوم المغناطيسية متوازية فيما بينها.
- يمثل الشكل (b-4) بنية صمام الدوران شبه الدائري Pseudo-spin valve: يتكون الهيكل المغناطيسي من طبقات مغناطيسية صلبة وناعمة بالتناوب، يتم تغيير اتجاه العزوم المغناطيسية تبعاً لنفاذية الطبقات المغناطيسية التي يمر عبرها.
- يمثل الشكل (c-4) بنية صمام الدوران spin valve: تكون طبقة FM العليا مصنوعة من مادة مضادة للمغناطيسية (AF) بينما طبقة FM السفلية حرة الدوران بواسطة المجال المغناطيسي المطبق.
- يمثل الشكل (d-4) بنية الأفلام الرقيقة granular thin film: يتم تضمين الرواسب المغناطيسية في المواد المعدنية غير المغناطيسية ويكون المجال المغناطيسي للحبيبات ذو اتجاهات عشوائية. توصل أيضاً كل من Fert و Grünberg فيما يتعلق بـ GMR أن اقتران الطبقات البينية يلعب دوراً حاسماً في الحصول على بنية صحيحة متعددة الطبقات التي يمكن أن تظهر تأثير GMR.

3-1-4 دوران الاستقطاب :

تتناسب الموصلية α للمعدن مع كثافة الإلكترونات عند مستوى فيرمي E_F ، وبالتالي تتناسب مع كثافة الحالات عند مستوى فيرمي $D(E_F)$.

يتطلب مبدأ استبعاد باولي Pauli exclusion أن يتم حساب إلكترونات الدوران للأعلى والأسفل بشكل منفصل بالتالي يتشكل لدينا نطاقات دوران فرعية منفصلة، تصطدم الإلكترونات بالقرب من سطح فيرمي باستمرار وتبعثر وتغير حالات الزخم أو ما يسمى بالعزم الزاوي، ولكن إذا بقي اتجاه دورانها بدون تغيير أثناء هذه العمليات، فيمكن كتابة الموصلية لكل من الإلكترونات الدورانية لأعلى وأسفل كالتالي $(E_F) D_{\downarrow} \alpha_{\downarrow}$ و $(E_F) D_{\uparrow} \alpha_{\uparrow}$ كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل (5) رسم تخطيطي لكثافة الحالات $D(E)$ كدالة للطاقة

حسب الشكل (5) فإن :

الشكل (a) يمثل المعادن غير المغناطيسية (استقطاب دوران صفري).

الشكل (b) يمثل المعادن الحديدية المغناطيسية (الاستقطاب الجزئي للدوران).

الشكل (c) نصف المعادن (الاستقطاب الكامل للدوران).

بالنسبة إلى المواد غير المغناطيسية مثل النحاس والفضة والذهب، فإن عدد الإلكترونات في النطاق الفرعي العلوي يساوي عدد الإلكترونات في النطاق الفرعي السفلي، كما أن النطاقات الفرعية متناظرة. وبالتالي في حالة المواد غير المغناطيسية تكون الموصلية متساوية $\sigma_{\uparrow} = \sigma_{\downarrow}$.

لكن بالنسبة للمواد الحديدية المغناطيسية مثل Fe و Co و Ni، نتيجة تفاعل التبادل (exchange interaction) بين العزوم المغناطيسية للذرات والعزوم المغناطيسية للإلكترونات الموجودة في المادة يتم إزاحة النطاقات الفرعية كما هو موضح في الشكل (5) وينتج عن هذا التحول ملء غير متساوٍ للنطاقات، وهو مصدر المغنطة للمواد المغناطيسية.

يؤدي عدم التماثل في كثافة الحالات عند مستوى فيرمي $[D_{\uparrow}(EF) \neq D_{\downarrow}(EF)]$ للمواد المغناطيسية إلى عدم تماثل الموصلية للإلكترونات الدورانية $\sigma_{\uparrow} \neq \sigma_{\downarrow}$ ويمكن أن يؤدي هذا التباين إلى استقطاب دوراني صافي (P)، يمكن تعريف استقطاب الدوران من حيث عدد الموجات الحاملة (n) التي لها دوران علوي (n_{\uparrow}) أو دوران سفلي (n) (بالعلاقة الآتية):

$$P = [(n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) / (n_{\uparrow} + n_{\downarrow})] \quad (5)$$

يمكن أيضًا أن يتم تعريفها إما من حيث الموصلية (σ) أو من حيث الكثافة $D(EF)$ بالعلاقات الآتية:

$$P = [(\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}) / (\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow})] \quad (6)$$

$$P = [(D_{\uparrow}(EF) - D_{\downarrow}(EF)) / (D_{\uparrow}(EF) + D_{\downarrow}(EF))] \quad (7)$$

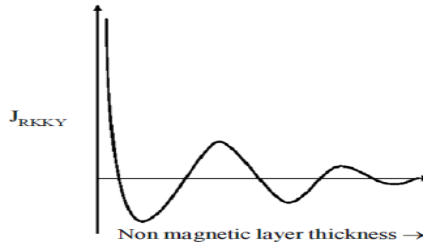
من تعريف استقطاب الدوران، من الواضح أن المواد غير المغناطيسية لها استقطاب دوران صفري في حين أن المواد المغناطيسية (مثل Fe و Co و Ni وسبائكها) لها استقطاب جزئي بنسبة 40-50%.

توجد فئة خاصة من المواد مثل (CrO_2 ، $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$) والتي تظهر استقطاب 100٪، وهي معروفة بأنها نصف معدنية. في هذه الحالة، يتم ملء نطاق فرعي واحد على مستوى Fermi ويكون النطاق الفرعي الآخر فارغاً تماماً (أي أن النطاق الفرعي للدوران يكون معدنياً بينما يكون النطاق الفرعي الآخر معزولاً). يبين الشكل (5) صورة النطاق البسيط للأنظمة المستقطبة الدوران المختلفة [10]. يؤدي زرع شائبة مغناطيسية ضمن النطاق (s) في بنية مكونة من مادة غير مغناطيسية إلى استقطاب عدد كبير من إلكترونات التوصيل، تعبر العلاقة التالية عن مؤثر هاملتون الذي يعطي الطاقة الكلية لنظام كمومي معين

$$Hint = -JS.s \quad (8)$$

حيث J هو ثابت تفاعل التبادل.

يوجد لدينا نوعين من الالكترونات وهما الالكترونات التوصيل والالكترونات الموضعية، يحدث التبادل غير المباشر نتيجة الاقتران بين العزوم المغناطيسية الموضعية للمعادن المغناطيسية عبر الالكترونات التوصيل بينما يحدث التبادل المباشر بين العزوم وهي قريبة بدرجة كافية بحيث يكون لها تداخل كاف في وظائفها الموجية. يحدث تفاعل RKKY (اختصار لأسماء العلماء الذين اكتشفوه -Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) في المعادن وأشباه الموصلات كما يلي: تتفاعل الالكترونات التوصيل مع الحقل المغناطيسي الفعال لموقع معين ضمن شبكة بلورية معينة وتكتسب نوعاً من استقطاب الدوران، عند المرور عبر موقع الشبكة التالي سوف يحدث تفاعل تبادل في كل من استقطاب الدوران ودوران موقع الشبكة البلورية بموجب هذا، يمكن وصف RKKY باستخدام مفهوم أن الالكترونات التوصيل تتحرك في مجال فعال تم إنشاؤه بواسطة عزم مغناطيسي محلي لموقع واحد. ويبين الشكل (6) اتجاه تباين اقتران تبادل الطبقة البينية (JRKKY) بسماكة الطبقة غير المغناطيسية في الطبقات المتعددة [10][11].



الشكل (6) اقتران تبادل بين طبقات (JRKKY) كدالة لسمك طبقة غير مغناطيسية

4-1-4 نموذج MOTT:

يمكن فهم أصل GMR من خلال النظر فقط في التأثيرات المعتمدة على الدوران، يفترض Mott أنه يمكن وصف الموصلية الكهربائية في المعدن من خلال وجود قناتي توصيل متشابهتين ومستقلتين إلى حد كبير، كل قناة تمثل عزم دوراني علوي وآخر سفلي. يتم تمثيل الموصلية الكلية بالنموذج الثنائي الحالي:

$$\alpha_{total} = \sigma_{\uparrow} + \alpha_{\downarrow} \quad (9)$$

إن التوصيل الكهربائي يحدث من قبل الإلكترونات ذات النطاق الترددي (sp) بشكل أساسي حيث أن كتلتها أقل فعالية و يمتلكان حركية أعلى. وبما أن نطاق d هو انقسام التبادل في المغناط الحديدية، فإن كثافة

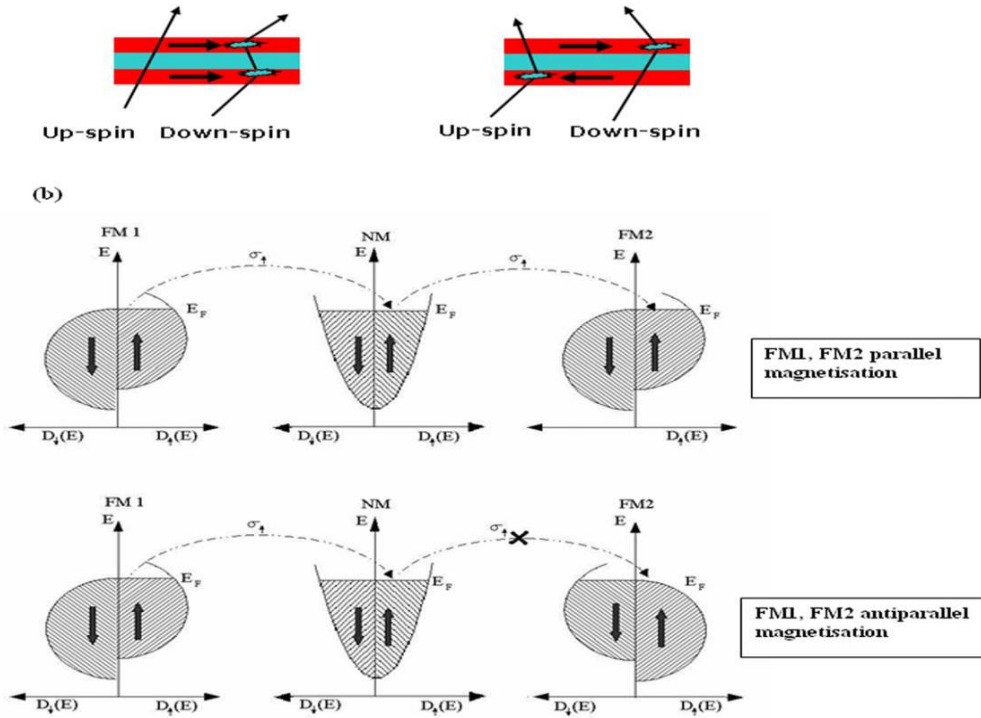
الحالات في الصعود والهبوط تختلف في مستوى Fermi لذلك فإن احتمالية تبعثر الإلكترونات في sp للأعلى والأسفل في الحالات القريبة من مستوى Fermi مختلفة بالتالي تختلف الموصلية لقناتي التوصيل.

باستخدام فرضيات Mott البسيطة، يمكن فهم أصل GMR في الطبقات المتعددة المغناطيسية، لنفرض لدينا بنية متعددة الطبقات مكونة من طبقتين مغناطيسيتين مفصولة بطبقة فاصل غير مغناطيسية كما هو موضح في الشكل (7). وسوف نفترض أن التبعثر يكون قوياً بالنسبة للعزوم الدورانية التي تتعارض مع اتجاه المغنطة وضعيفاً في حال كان اتجاه العزوم الدورانية موازياً لاتجاه المغنطة.

في حالة التكوين المتوازي: تكون الإلكترونات المنقسمة متبعثرة على نحو ضئيل في كل الطبقات وتؤدي إلى مقاومة منخفضة.

ولكن في حالة التكوين الغير متوازي: تتبعثر الإلكترونات إلى الأعلى والأسفل بالتناوب بقوة مما يؤدي إلى مقاومة أعلى.

نفس الفرضية يمكن استخدامها لفهم GMR في النظام الحبيبي أيضاً. في الحقل الذي قيمته صفر، يتم توجيه العزوم المغناطيسية للرواسب بشكل عشوائي، لذلك تتبعثر صعودا وهبوطا بقوة مما يؤدي إلى مقاومة عالية. ولكن مع تطبيق المجال المغناطيسي المشبع، تتم محاذاة جميع الرواسب وينتج عنها مقاومة منخفضة كما هو موصوف أعلاه اعتمادا على اتجاه مغنطة المواد فيما يتعلق باستقطاب دوران التيار، يمكن أن تتصرف المادة إما كعازل أو موصل [12].



الشكل (7) مخطط توضيحي لنقل الإلكترون في الطبقات المتعددة

فيما يلي شرح للمخططات الموجودة بالشكل (7):

(a) مخطط توضيحي لنقل الإلكترون في الطبقات المتعددة من أجل التمتع المتوازي وغير المتوازي للطبقات المغناطيسية المتعاقبة. يشار إلى اتجاهات المغنطة بواسطة الأسهم العريضة.

(b) تمثيل تخطيطي لانتقال الكترون عبر بنية مكونة من معدن مغناطيسي (FM1) و معدن غير مغناطيسي (NM) و معدن مغناطيسي ثانٍ (FM2) ضمن اتجاهات مغنطة متوازية وأخرى غير متوازية. لا يُسمح بنقل إلكترونات الدوران من FM1 إلى FM2 في التكوين الغير المتوازي (مقاومة أعلى) ولكن للحالة المتوازية مسموح (مقاومة منخفضة).

4-1-5 النموذج الكهربائي للحساس المغناطيسي وفق تقنية GMR:

يبين الجدول (1) مقارنة بين حساسات هول و حساسات AMR و حساسات GMR من حيث الحجم ومستوى كشف الاشارة الاستقرار الحراري والوزن واستهلاك الطاقة والتكلفة. [1]

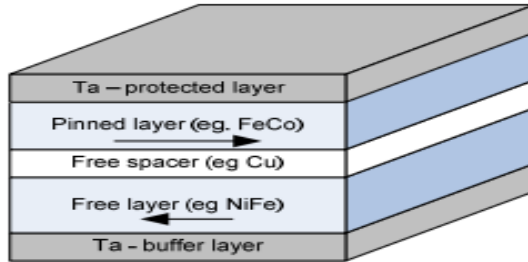
الجدول(1): مقارنة بين الحساسات المغناطيسية

Benefits/Elements	Hall	AMR	GMR
Sensor Size:	+	-	+
Signal level:	-	0	+
Sensitivity:	-	+	+
Temp. Stability:	-	0	+
Module weight:	-	+	+
Module size:	-	+	+
Power conservation:	+	-	+
System cost:	+	-	+

تتميز حساسات GMR بحساسيتها العالية، الخطية linearization، اكتشاف الحقول المغناطيسية الصغيرة من رتبة (10 nT) وضمن تردد (1 HZ)، العمل ضمن الظروف الغير المناسبة، استقرار حراري جيد. يمكن تصنيع عناصرها GMR elements بتقنية الحفر الضوئي وبمنطقة صغيرة ضمن الرقاقة، ولأن أحجامها صغيرة سيكون حجم الحساس صغير وبالتالي استهلاك الاستطاعة أقل.

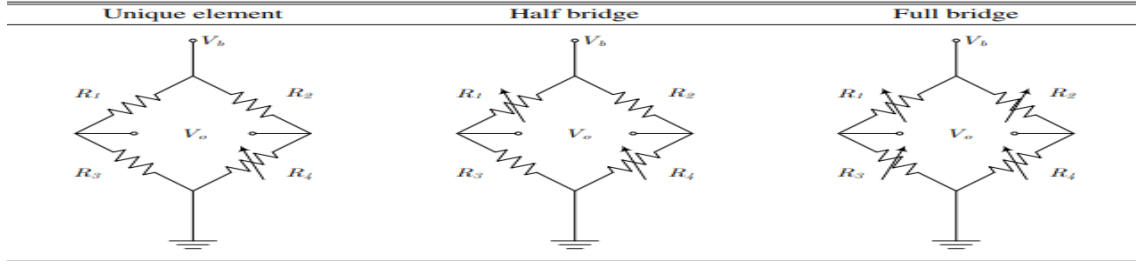
Spin valve الصمامات الدورانية هي البنية المثالية لتصميم الحساسات.

لها شكل sandwich form، طبقة pinned اتجاه مغنطتها ثابت، طبقة free اتجاه مغنطتها يتغير تبعاً للحقل الخارجي. الاستجابة خطية إذا كان الحقل الخارجي بنفس اتجاه مغنطة pinned.



الشكل (8) بنية الصمام الدوراني

الحساس عبارة عن مقاومة متغيرة وأبسط مثال يعبر عن حساس GMR هو جسر وطسطن بمقاومتين متغيرتين حتى يلائم المتطلبات التصميمية كما هو موضح بالشكل (9) حيث استخدمنا جسر وطسطن من نوع Half bridge.

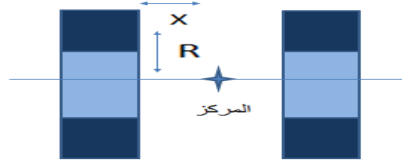


الشكل (9) أنواع جسر وسططن

الكمية الفيزيائية المراد قياسها هي التيار و استخدمنا المنهجية الآتية لقياسه:

استخدام ملفين لتوليد حقل مغناطيسي مضاد وبالتالي سوف يمنع تدفق الحقل المتولد عن التيار المار في الكابلات يؤدي ذلك إلى انخفاض التدفق المغناطيسي المار عبر GMR وبالتالي انخفاض قيمة التيار. لذلك نستخدم مضخم استطاعة بريح كبير ليكون تيار الخرج متناسب مع تيار الدخل.

الملفان الدائريان متطابقان لهما نفس القطر ونفس عدد اللفات يوضعان بشكل متوازي على طول محور X مار من منتصف المسافة بينهما، يتدفق نفس التيار عبر الملفين وبالتالي الحقل المغناطيسي قرب المركز متجانس تقريبا.

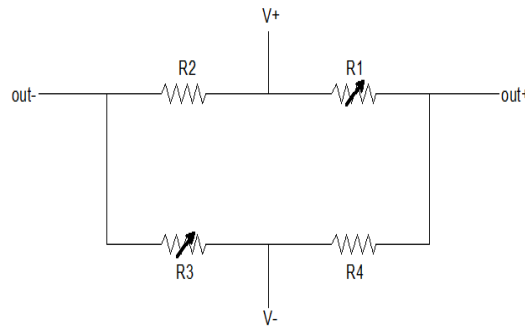


الشكل(10) الملفان المستخدمان لتوليد حقل مضاد

إذا كان الملفان يحتويان على عدد N من اللفات فإن الحقل المغناطيسي يضرب ب N.

يتم تمثيل حساس GMR باستخدام جسر وسططن : يكون لدينا مقاومتين لهما قيمة ثابتة ومقاومتين متغيرتين تتأثران بالحقل المغناطيسي الخارجي حيث كلما زاد الحقل كلما نقصت قيمة المقاومتين.[3] يعطى خرج الحساس بالعلاقة الآتية:

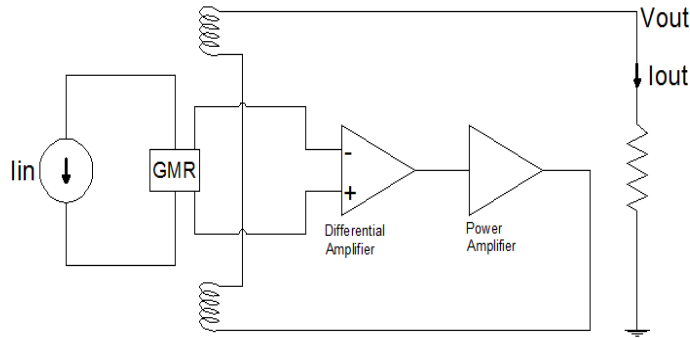
$$v_{op} - v_{on} = (v_+ - v_-)(R_3 R_2 + R_3 - R_4 R_1 + R_4) \quad (10)$$



الشكل(11) حساس GMR

تم تطوير الحساس بإضافة التضخيم على مرحلتين، بالمرحلة الأولى تم إضافة مضخم تفاضلي لأن مقاومة الحساس تتغير تبعا للحقل حيث يمكننا ملاحظة التغير من اختلاف الجهد عبر الخرج التفاضلي للحساس وبالمرحلة الثانية تم إضافة مضخم استطاعة للحفاظ على الإشارة من التخماد يوضع الحساس الموجود بالشكل

(11) بين الملفين كما هو موضح في الشكل (12) :



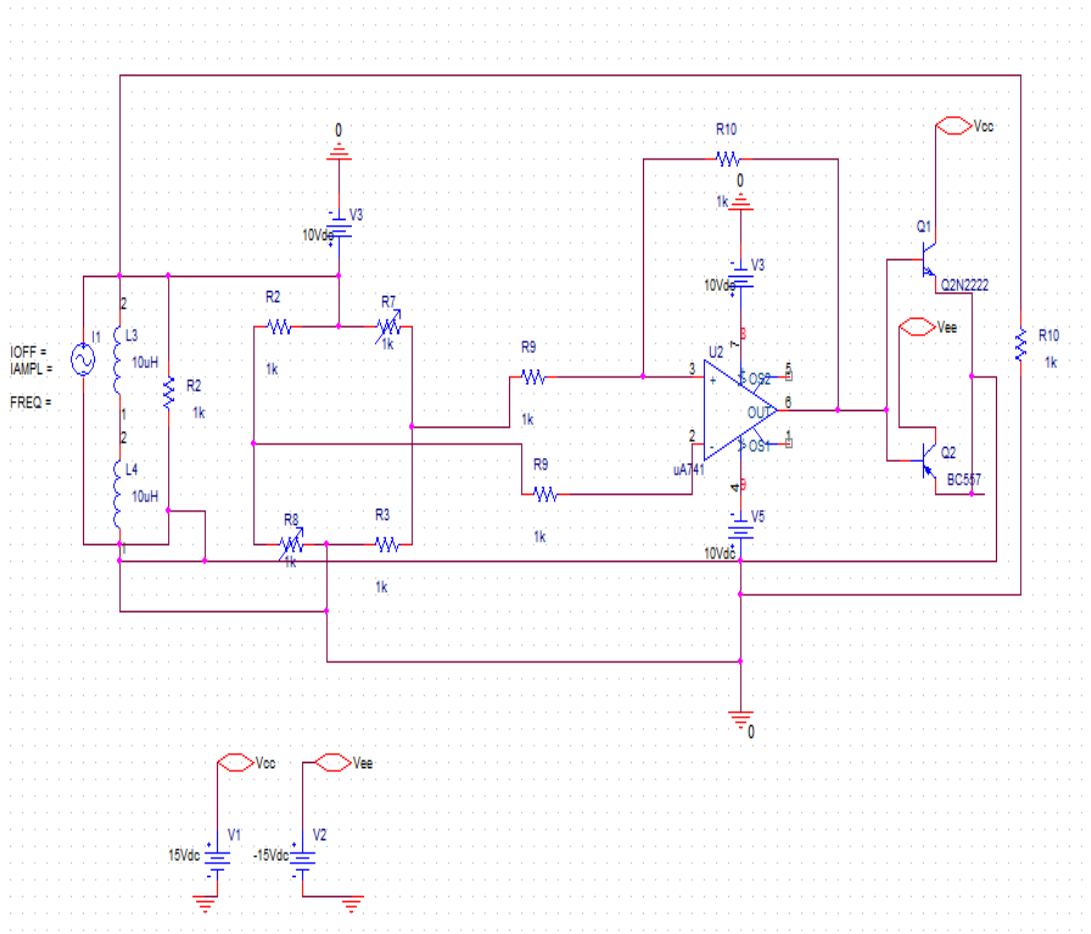
الشكل(12)النموذج الكهربائي النهائي لحساس GMR

يتدفق تيار الدخل I_{in} عبر الأسلاك الموجودة قرب الحساس، تتغير مقاومة الحساس تبعاً للحقل المغناطيسي المتولد عن التيار. يتناسب تغير المقاومة مع قوة الحقل ويمكن قياس قوة الحقل من طرفي جهد GMR.

يمكن قياس I_{out} مباشرة، يوضع الملفان على جانبي الحساس بالتالي يمنع الحقل المتولد عن الملفين الحقل المتولد من التيار المار في الأسلاك وبذلك يكون التدفق المغناطيسي مناسب للتصميم (الخطية).

الشكل(13) يبين النموذج الكهربائي لحساس GMR باستخدام برنامج ORCAD.

قيم العناصر الموجودة بالشكل (13) يمكن تغييرها مع الحفاظ على مجال تغيير المقاومتين المتغيرتين R7 و R8 بين 6 إلى 20 % حتى تكون ضمن مجال GMR.



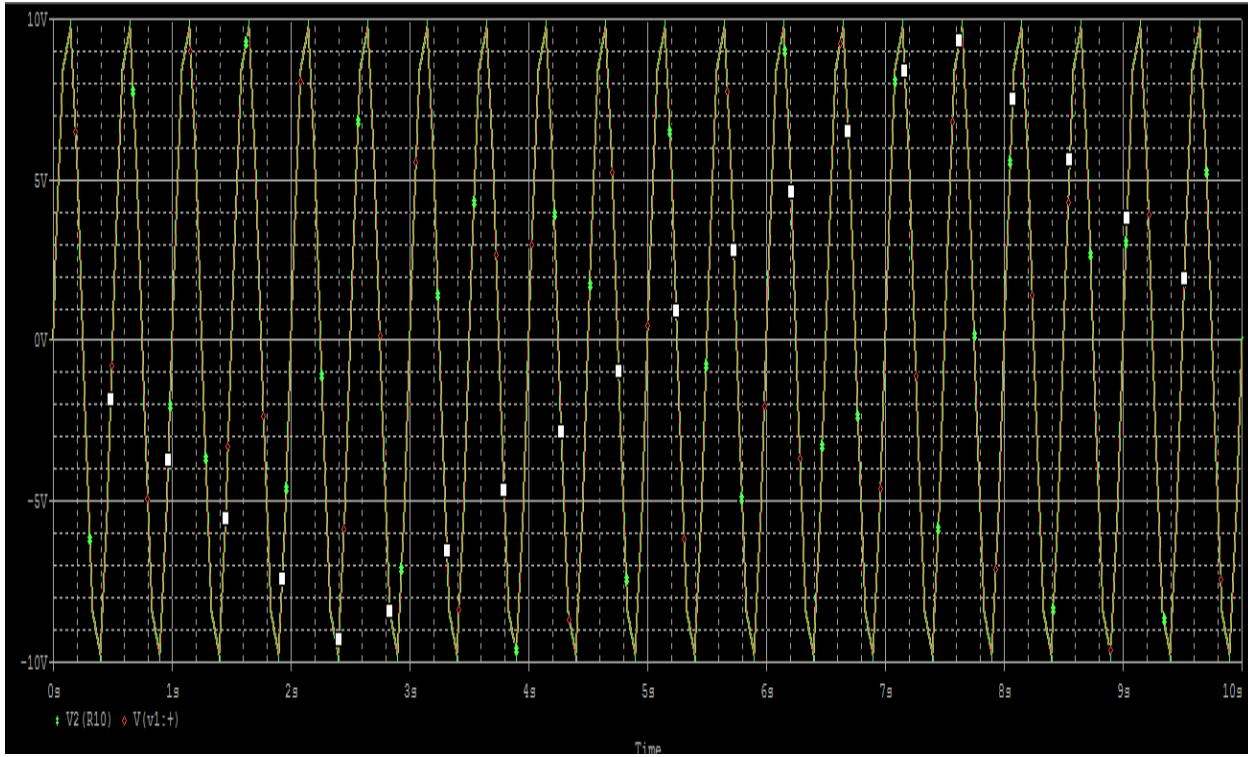
الشكل(13)النموذج الكهربائي للحساس باستخدام برنامج ORCADE

5 النتائج والمناقشة:

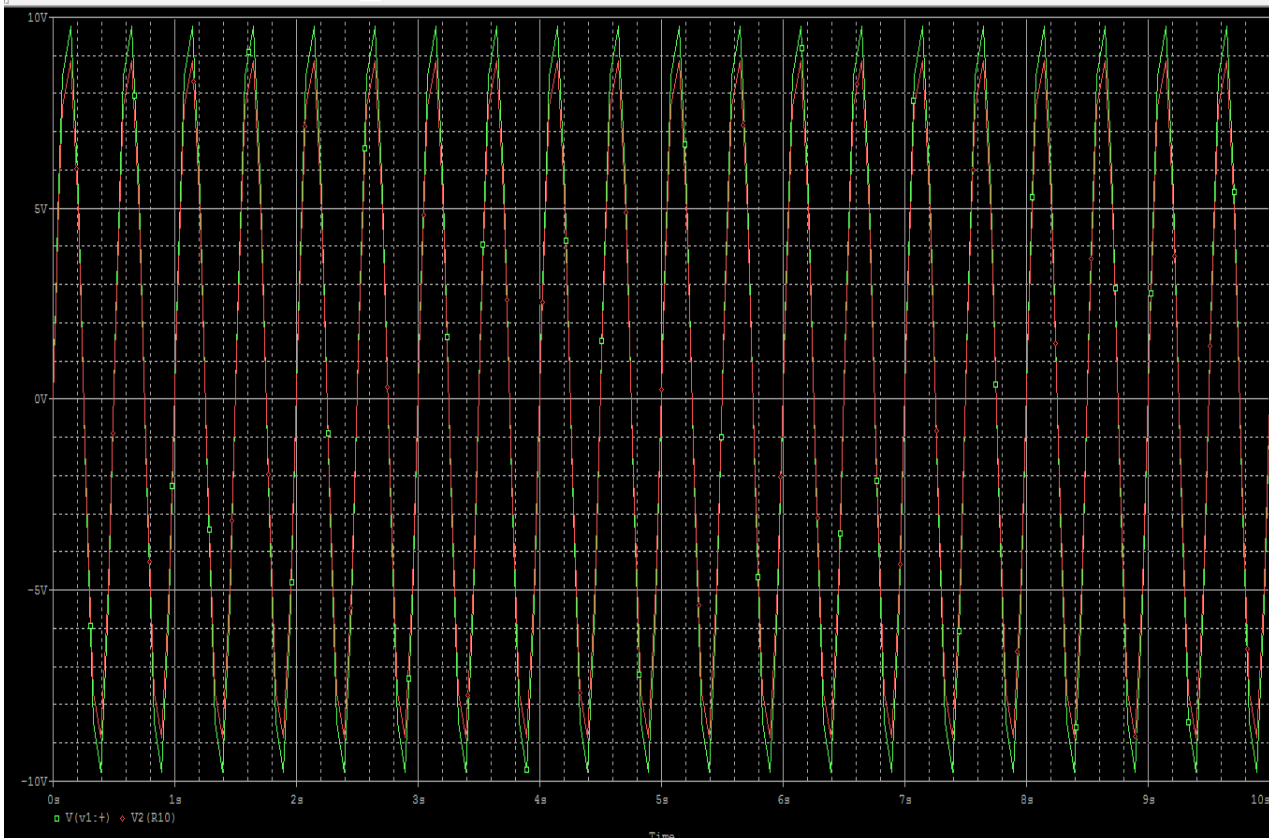
يبين الشكل (14) النتائج التي حصلنا عليها عند اجراء المحاكاة باستخدام برنامج PSPICE حيث تم استخدام التعليمة TRAN الخاصة بالتحليل الزمني للدائرة المحور الشاقولي يعبر عن البارمتر المراد دراسته والمحور الأفقي يعبر عن الزمن. البارمتر الذي تم استخدامه هو v1 (المنحني باللون الأحمر) والذي يعبر عن جهد الدخل الناتج عن مرور التيار i1 (والذي عبرنا عنه بمنبع جيبي) ضمن جسر وطسطن، البارمتر الآخر هو v2 (المنحني باللون الأخضر) يمثل الخرج أي هبوط الجهد على المقاومة R10.

تم تغيير قيم المقاومتين المتغيرتين R7 و R8 بنسبة 20%، نلاحظ جهد الدخل يشابه جهد الخرج وبالتالي الحساس قام بعمله المطلوب.

نلاحظ من الشكل (15) انحراف جهد الدخل عن الخرج عندما قمنا بتغيير قيم المقاومتين المتغيرتين R7 و R8 بنسبة 30% وأصبحنا خارج حدود GMR.



الشكل (14) نتائج محاكاة برنامج PSPICE بنسبة تغيير %20



الشكل (15) نتائج محاكاة برنامج PSPICE بنسبة تغيير %30

6- التوصيات والآفاق المستقبلية:

- زيادة مجال الحساسية من خلال إضافة أربع مقاومات متغيرة تبعا للحقل المغناطيسي الخارجي (TMR).
- يمكن استخدام النموذج لقياس كميات فيزيائية أخرى وذلك من خلال تعديل مرحلة الدخل.
- استخدام أنواع أخرى من المضخمات بما يتناسب مع التطبيق حيث تم استخدام المضخم LM385.

7-المراجع:

- [1] ŽUTIC, V.; IGOR; FABIAN, G; SARMA, S. 2004, Spintronics: Fundamentals and applications ,Reviews of modern physics 76.2.
- [2] Wolf, S. A., Chtchelkanova, A. Y., & Treger, D. M. (2006). Spintronics—A retrospective and perspective. IBM journal of research and development, 50(1), 101-110.
- [3] Freitas, P. P., Ferreira, R., & Cardoso, S. (2016). Spintronic sensors. Proceedings of the IEEE, 104(10), 1894-1918.
- [4] Dietl, T., Awschalom, D. D., Kaminska, M., & Ohno, H. (Eds.). (2009) Spintronics. Academic Press.
- [5] Lenz, J., & Edelstein, S. (2006). Magnetic sensors and their applications. IEEE Sensors journal, 6(3), 631-649.
- [6] Murata, S., & Ohashi, Y. (1991). U.S. Patent No. 5,028,868. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [7] Thomson, W. (1857). XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:—Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron. Proceedings of the Royal Society of London, (8), 546-550.
- [8] Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F. N., Petroff, F., Etienne, P., ... & Chazelas, J. (1988). Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. Physical review letters, 61(21), 2472.
- [9] Tsymbal, E. Y., & Pettifor, D. G. (2001). Perspectives of giant magnetoresistance. Solid state physics, 56, 113-237.
- [10] Johnson, M. (Ed.). (2004). Magnetoelectronics. Elsevier.
- [11] Lieber, C. M., & Zhang, Z. (1994). Solid State Physics, Edited by H. Ehrenreich and F. Spaepen.
- [12] Samal, D., & Kumar, P. A. (2008). Giant magnetoresistance. Resonance, 13(4), 343-354.
- [13] Hirohata, A. Yamada, K. Nakatani, Y. Preibeau, I. (2020). Review on spintronics: Principles and devices applications .journal of Magnetism and Magnetic Materials.