

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة العربي التبسي - تبسة

كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة و الحياة

قسم : علوم المادة



مذكرة ماستير

الميدان : علوم المادة

الشعبة : فيزياء

التخصص : فيزياء المواد

دراسة مقارنة لطرق استخراج الخواص الكهرومغناطيسي للمواد الخارقة

تقديم : قواسمية وفاء و بوزيان كلثوم

أمام لجنة المناقشة :

رئيسا	جامعة تبسة	أستاذ محاضر أ	فرح هشام
مؤطرا	جامعة تبسة	أستاذ محاضر أ	زيار توفيق
ممتحنا	جامعة تبسة	أستاذ محاضر ب	طق محمد أمين

تاريخ المناقشة : 2020/06/15

الحمد لله الرحمن الرحيم

الحمد لك الحمد حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

الحمد لك الحمد حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

ملخص

الهدف من مذكرة الماستر هذه هو دراسة مقارنة لطريقتي استرداد الخواص التأسيسية ل نمطي مادة خارقة مستوية معروفين : المرنان ذو الحلقة بشق (SRR) و شبكة السيقان المعدنية ، العمل تم باستخدام المحاكاة العددية لموجه موجي يعتمد على الطريقة التكرارية المرتكزة على مفهوم الموجة الكهرومغناطيسية العرضية المعروفة ب (WCIP) اختصارا ل (Wave Concept Iterative Procedure) بالإنجليزية و ذلك لاستخراج الوسائط S التي تُستخدم بدورها لاستخراج الخواص التأسيسية للمادة الخارقة.

تم تصميم برنامج محاكاة عددية يركز على الطريقة التكرارية باستخدام برنامج MATLAB ، لنمذجة المواد وحساب الوسائط S ، مقرون بطريقتي استرداد مختلفتين: طريقة (NRW) وطريقة (Chen) اللتين استعملتا في حساب و استخراج الخواص التأسيسية المطلوبة من : سماحية ϵ ، نفاذية μ ، قرينة إنكسار n ...

الكلمات المفتاحية : مادة خارقة ، النفاذية، السماحية، قرينة إنكسار، المحاكاة، طريقة NRW وطريقة Chen

Abstract

The aim of this master dissertation is a comparative study of two methods of extracting the constitutive characteristics of two patterns of known planar metamaterials : the SRR ring resonator and the network of metal rods, the task is executed by using a numerical simulation of a waveguide which is based on an iterative method based on the concept of the transverse electromagnetic wave known under the abbreviation (WCIP) taken from (**W**ave **C**oncept **I**terative **P**rocedure) to extract the parameters S which are used in their turn to extract the constitutive characteristics of metamaterials.

An iterative numerical simulation program was designed using MATLAB software, for the modeling of materials and the calculation of parameters S , coupled with two different extraction methods: the NRW method and the Chen method used to calculate and extract constitutive characteristics namely the permittivity, the permeability, the index of refraction ...

Keywords: Metamaterial, permeability, permittivity, index of refraction, simulation, NRW method and Chen method.

Résumé

Le but de ce mémoire de master est l'étude comparative de deux méthodes d'extraction des caractéristiques constitutives de deux motifs de metamatériaux planaires connus: le résonateur en anneau (SRR) et le réseau de tiges métalliques, utilisant une simulation numérique d'un guide d'ondes qui s'appuie sur une méthode itérative basée sur le concept de l'onde électromagnétique transverse connue sous l'abréviation (WCIP) tirée de l'anglais (Wave Concept Procédure itérative) pour extraire les paramètres S qui sont utilisés à leur tour pour extraire les caractéristiques constitutives du metamatériau.

Un programme de simulation numérique itératif a été conçu à l'aide du logiciel MATLAB, pour la modélisation des matériaux et le calcul des paramètres S , couplé à deux méthodes d'extraction différentes: la méthode NRW et la méthode de Chen utilisées pour calculer et extraire les caractéristiques constitutives à savoir la perméabilité, la permittivité, l'indice de réfraction ...

Mots clés : Metamatériaux, perméabilité, permittivité, indice de réfraction, simulation, méthode NRW et méthode de Chen.

إهداءات

.....

.....

.....

.....

.....

بوزيان كلثوم

إهداءات

.....

.....

.....

.....

.....

قواسمية وفاء

تشكرات

أول من يشكر ويحمد آناء الليل وأطراف النهار ، هو العلي القهار ، الأول والآخر والظاهر والباطن ، الذي أغرقنا بنعمه التي لا تحصى، وأغدق علينا برزقه الذي لا يفنى ، وأنار دروبنا. فله جزيل الحمد والثناء العظيم ، هو الذي انعم علينا ، إذ أرسل فينا عبده ورسوله "محمدنا بن عبد الله " عليه أزكى الصلوات واطهر التسليم ، أرسله بقرانه المبين ، فعلمنا ما لم نعلم ، وحثنا على طلب العلم أينما وجد.

الله الحمد كله والشكر كله أن وقفنا وألهمنا الصبر على المشاق والمتاعب التي اعترضتنا في مسيرتنا الدراسية من أول المراحل الدراسية إلى يومنا هذا ، ونشكره على تمسكنا الشديد بطلب العلم درجات والرغبة في التآلق والنجاح ، وقد امتن علينا ووقفنا وصولاً لنيل رغبتنا في استكمال شهادة الماستر في فيزياء المواد . وبعد نتقدم بالشكر الجزيل و فائق التقدير و الاحترام لمؤطرنا الأستاذ زيار توفيق أستاذ محاضر "أ" بجامعة تبسة الذي كان له الدور الكبير والفعال في انجاز مذكرتنا ،وقد ساندنا في عملنا هذا بحسن إشرافه وتعاونه، بدعمه لنا بمصادر المعلومات و الإرشادات، و العديد من التوجيهات وقد أمدنا أيضا بما احتجنا إليه من مؤلفات ومراجع واستفسارات ومعلومات قيمة ، ولا ننسى الوقت الذي بذل فيه جهده في إعداد الأفضل لمذكرتنا، و الذي كان لها الأثر الكبير في إنجاح هذا العمل. ومنك تعلمنا إن للنجاح قيمة ومعنى... ومنك تعلمنا كيف يكون التفاني والإخلاص في العمل... ومنك أمانا إن لا مستحيل في سبيل الإبداع والرقي والتقدم لنيل مراتب سامية في طلب العلم .

كما لا ننسى الشكر الجزيل مع فائق الاحترام والتقدير لأعضاء لجنة المناقشة الأساتذة الأجلاء:

الأستاذ فرح هشام أستاذ محاضر "أ" بجامعة تبسة رئيس اللجنة المناقشة

الأستاذ طق محمد أمين أستاذ محاضر "ب" بجامعة تبسة عضو لجنة المناقشة

على تشريفهم لنا بقبول مناقشة المذكرة و تقديرا منا لما بذلوه من وقت و جهد و ما سيوجهون لنا من ملاحظات قيمة. كما نشكر في هذا المقام، كل أساتذتنا الذين لم يبخلوا علينا بنصائحهم وارشاداتهم ونشكر كل طاقم علوم المادة من اداريين وعمال و اساتذة، قاموا بعملهم بجد وتفاني وإخلاص ، ولا ننسى أيضا زملائنا في كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة بجامعة العربي التبسي بتبسة ،حيث نجد دوما من نعتبرهم المثل الأعلى في البذل، الإخلاص، العطاء والتواضع . كما نشكر كل من مد لنا يد العون من قريب او بعيد وساهم في اعداد مذكرتنا.

وفي الاخير لا يسعنا الا ان ندعو الله عز وجل ان يرزقنا السداد والرشاد ، والعفاف والغنى وان يجعلنا هداة مهتدين.

الفهرس

01.ص	.....	مقدمة عامة
04.ص	.....	1. الفصل الأول : الخواص الكهرومغناطيسية للمواد والمواد الخارقة
05.ص	.....	1.1 مقدمة الفصل الأول
05.ص	.....	1. 2. الخواص الكهرومغناطيسية للمواد
05.ص	.....	1. 2.1. 1. الاستقطاب
07.ص	.....	1. 2. 2. المغنطة
07.ص	.....	1. 3.2.1 معادلات ماكسويل Maxwell في الفراغ
09.ص	.....	1. 2. 4. العلاقات التأسيسية
11.ص	.....	1. 3. المواد الخارقة
12.ص	.....	1. 3. 1. مقارنة Veselago
14.ص	.....	1. 3. 2. السماحية والنفاذية السالبتان
15.ص	.....	1. 3. 3. 1. النفاذية السالبة
19.ص	.....	1. 3. 4. السماحية السالبة
21.ص	.....	1. 3. 5. قرينة الإنكسار السالبة
22.ص	.....	1. 4 خاتمة الفصل الاول
23.ص	.....	2. الفصل الثاني : طرق الإسترداد لتخصيص المواد
24.ص	.....	2. 1. مقدمة الفصل الثاني
24.ص	.....	2. 2. تقديم طريقة المحاكاة : الطريقة التكرارية (WCIP)
27.ص	.....	2. 3. تقديم المعادلات النظرية لطريقتي الاسترداد
27.ص	.....	2. 3. 1. طريقة NRW

29.ص.....	طريقة CHEN . 2 . 3 . 2
30.ص.....	4 . خاتمة الفصل الثاني.....
	3. الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية
32.ص.....	باستخدام الطريقة التكرارية (WCIP) مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين.....
33.ص.....	1.3. مقدمة الفصل الثالث.....
33.ص.....	3. 2 دراسة بالمحاكاة للعناصر المكونة للمواد اخارقة ..
33.ص.....	3 . 2 . 1 . المرنانات ذات الحلقة بشق ..
38.ص.....	3 . 2 . 2 ..شبكة السيقان المعدنية.....
42.ص.....	3 . 3 . خاتمة الفصل الثالث.....
44.ص.....	الخاتمة العامة.....
45.....	المراجع.....

قائمة الأشكال

الصفحة	العنوان	شكل رقم
	ظهور عزم ثنائي القطب \vec{P} في وجود حقل كهربائي خارجي	شكل 1.1
	معلم ثلاثي غير مباشر مبين بواسطة قاعدة اليد اليسرى Veselago \mathcal{L}	شكل 2.1
	تمثيل معلم ثلاثي بالأشعة (a) وسط يد اليمنى (b) وسط يد	شكل 3.1
	المرنانات SRR بحلقة واحدة	شكل 4.1
	المرنانات SRR بحلقتين	شكل 5.1
	الأسطوانة السويسرية المقدمة من طرف Purdry.	شكل 6.1
	النفاذية محسوبة و مقاسة لهيكل أسطوانة سويسرية ذات 35 لفة	شكل 7.1
	الهياكل ذات السماحية السالبة (a) مرنان C الذي اقترحه O'Brin (b) ساق معدنية	شكل 8.1
	صورة توضيحية لأشعة الحقول [42]	شكل 1.2
	خط محوري مع قرص حلقي من المادة المراد قياس خصائصها	شكل 2.2
	خط محوري مع قرص حلقي من المادة المراد قياس خصائصها	شكل 3.2
	تمثيل و أبعاد المرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع في موجة موجي مستطيل	شكل 1.3
	تغيرات سعات وسائط الإرسال و الإنعكاس S_{21} و S_{11} بدلالة التواتر للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع.	شكل 2.3
	تغيرات الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي الممانعة المرئية من المنبع (z) بدلالة التواتر للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع.	شكل 3.3
	تغيرات الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للنفاذية الفعالة ϵ_{eff} للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع (a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW	شكل 4.3

شكل 5.3	تغيرات الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي للسماحية الفعالة ϵ_{eff} للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع (a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW
شكل 6.3	تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي لقرينة الانكسار n للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع. (a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW
شكل 7.3	تمثيل و أبعاد لشبكة السيقان المعدنية
شكل 8.3	تغيرات سعات وسائط الإرسال و الإنعكاس S_{11} و S_{21} بدلالة التواتر لشبكة السيقان المعدنية
شكل 9.3	تغيرات الجزء الحقيقي و الجزء التخيلي الممانعة المرئية من المنبع (z) بدلالة التواتر لشبكة السيقان المعدنية
شكل 10.3	تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للنفاذية الفعالة ϵ_{eff} لشبكة السيقان المعدنية (a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW
شكل 11.3	تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للسماحية الفعالة ϵ_{eff} لشبكة السيقان المعدني (a) باستعمال طريقة chen (b) باستعمال طريقة NRW
شكل 12.3	تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي لقرينة الانكسار n لشبكة السيقان المعدنية.

قائمة الرموز او الاختصارات

التفسي	الرمز أو
الرنانات ذات الحلقة بشق	SRR
الطريقة التكرارية لاستخراج	WCIP
مصفوفة وسائط التشتت	S
السماحية المركبة	E
النفاذية المركبة	μ
الإشعاع الكهرومغناطيسي	E/M
طول الموجة	Λ
سلبية مزدوجة	DNG
وسيط الانعكاس	S11
وسيط الإرسال	S21
الحقل الكهربائي الخارجي	\vec{E}_{ext}
مركز ثقل الأبعاد للشحنات السالبة	G_-
مركز ثقل الشحنات الموجبة	G_+
العزم ثنائي القطب الكهربائي المستحث	\vec{P}
الحقل الكهربائي للاستقطاب	\vec{E}_p
الحقل المغناطيسي الممغنط المستحث	\vec{B}_{aim}
العزم ثنائي القطب المغناطيسي	\vec{M}
الحقل المغناطيسي الخارجي	\vec{B}_{ext}
الشحنة	q
السماحية في الفراغ	ϵ_0
النفاذية في الفراغ	μ_0
المؤثر (نابلا)	$\vec{\nabla}$
الحقل المغناطيسي	\vec{B}
الحقل الكهربائي	\vec{E}
كثافة التيار الكهربائي	\vec{J}
كثافة التيارات الكلية	J_{total}
كثافة الشحنات الكلية	ρ_{total}
كثافة الشحنات الحرة الموجودة في غياب الاستقطاب	ρ_{libres}
كثافة الشحنات المربوطة في المادة	$\rho_{liées}$

كثافة الشحنات المستقطبة	ρ_{pol}
الإثارة الكهربائية	\vec{D}
كثافة تيار التوصيل للشحنات الحرة المحتملة في الوسط في غياب الاستقطاب	\vec{J}_{libres}
كثافة التيار للشحنات المرتبطة في المادة	$\vec{J}_{liées}$
كثافة التيار للشحنات المستقطبة	\vec{J}_{pol}
كثافة التيار الممغنط المستحث	\vec{J}_{aim}
الإثارة المغناطيسية	\vec{H}
الحساسية المغناطيسية	χ_m
الحساسية الكهربائية	χ_e
مادة اليد اليسرى	LHM
شعاع الموجة الانتشار	\vec{k}
نبض الموجة أحادية اللون	Ω
سرعة الضوء في الوسط	c
مركبة شعاع الموجة في الاتجاه i	k_i
مركبة شعاع الموجة في الاتجاه j	k_j
مركبات S	S_{ij}
مركبات شعاع الموجة	k_{ij}
مركبات السماحية	ϵ_{ij}
مركبات النفاذية	μ_{ij}
قرينة الانكسار للمادة	
عزم الثنائي القطب الكهربائي	\vec{P}
سرعة الطور	v_ϕ
سرعة المجموعة	v_g
مادة اليد اليمنى	RHM
الجزء الحقيقي للنفاذية الفعالة	μ_r
الجزء الحقيقي للسماحية الفعالة	ϵ_r
الجزء التخيلي للسماحية الفعالة	ϵ_i
الجزء التخيلي للنفاذية الفعالة	μ_i
مادة ذات مؤشر مزدوج سالب	DNI

تواتر الرنين	f_{res}
النفاذية النسبية	μ_{rel}
السماحية النسبية	ϵ_{rel}
كثافة الطاقة الكهرومغناطيسية	W
سعة الأمواج الواردة	\vec{A}_i
سعة الأمواج المنعكسة	\vec{B}_i
الممانعة الذاتية للوسط i	Z_{0i}
تمثل ممانعة الفراغ	Z_0
تمثل سماحية العزل النسبية للوسط i	ϵ_{ri}
مؤثر الانعراج	\hat{S}
مؤثر الانعكاس	$\hat{\Gamma}$

في المجال التواتري يمكن وصف جميع المواد كهربائياً بواسطة سماحيته المركبة (ϵ) ونفاذيتها المركبة (μ) التي تحدد كيفية استجابة المواد للإشعاع الكهرومغناطيسي (EM) . المعرفة الدقيقة لهذه الخواص التأسيسية مطلوب ليس فقط للتطبيقات العلمية ولكن أيضاً للتطبيقات الصناعية. بسبب عدم اليقين في عمليات التصنيع ، غالباً ما تكون الطريقة الوحيدة للعثور على الخواص المرغوبة للمواد هي قياسها دورياً أثناء جميع مراحل التصنيع.

نظرياً ، يمكن استخراج النفاذية المركبة μ و السماحية المركبة ϵ من قياسات وسائط الانعكاس والإرسال ، ومع ذلك ، هناك العديد من المشاكل العملية التي تنشأ ، بما في ذلك الغموض عند ما يكون سمك المادة تحت الاختبار يساوي أحد مضاعفات ربع طول الموجة ($\lambda / 4$) وهناك المزيد من الصعوبات في استخراج هذه الخواص عندما تكون المادة قيد الاختبار (القياس) مادة خارقة تركز خصائصها على التردد بطريقة معقدة.

يمكن إجراء قياسات الإرسال والانعكاس في الفضاء الحر باستخدام عينة كبيرة من المواد إذا تم توخي الحذر. ومع ذلك ، فإن استخدام العينات كبيرة أمر غير مرغوب فيه إذا كان الهدف هو البحث عن العديد من خواص المواد المختلفة. الطريقة المثلى و الأكثر نجاعة هي القياسات داخل الموجه الموجي (waveguide) باستخدام عينات صغيرة. وقد تم استعمال محاكي للموجه الموجي منذ عقود في تصميم عناصر مصفوفة هوائيات .

بالنسبة للمواد الخارقة ، تعد طريقة الاسترداد القائمة على المحاكاة جذابة للغاية. خواص المواد الفيزيائية المستخدمة لبناء المواد الخارقة معروفة (على سبيل المثال ، ركائز عازلة وموصلات). لكن الخواص الفعالة هي ما يلزم لتصميم الأجهزة باستخدام المواد الخارقة. إذا أمكن الحصول على القيم الفعالة للخواص من المحاكاة ، فهذا يعتبر أكثر فعالية من بناء عينات حقيقية للاختبار أو القياس.

المواد الخارقة التي لها سماحية مركبة ونفاذية مركبة كلاهما سلبيتان عبر بعض نطاقات التواتر تسمى مادة خارقة ذات سلبية مزدوجة (DNG) اختصاراً ل (Double NeGative) بالإنجليزية

مما يؤدي إلى قرينة انكسار سالبة. تتسبب هذه الخاصية غير العادية للمواد الخارقة في انكسار الموجات الكهرومغناطيسية بزوايا سلبية بالنسبة للمواد التقليدية (الطبيعية). تم تطوير طرق استرداد مختلفة للخواص المكونة لهذه المواد باستخدام القيم المركبة لقياسات وسيط الانعكاس (S11) و وسيط الإرسال (S21). إحدى هذه الطرق تتم بتقريب بيانات قياسات الوسائط S بشكل واضح مع قيمة سماحية معروفة (مثال ، نموذج Drude) أو قيمة نفاذية معروفة (مثال ، نموذج لورنتز Lorenz). ومع ذلك ، فإن هذه الطريقة تعرض فرضيات متباينة حول شكلي السماحية و النفاذية. في هذه المذكرة ، يتم تقديم وبرمجة طريقتي استرداد لاستخراج السماحية و النفاذية مباشرة انطلاقاً من الوسائط S المستخرجة عن طريق المحاكاة.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة مقارنة لطريقتي استرداد الخواص التأسيسية ل نمطي مادة خارقة مستوية معروفين، باستخدام المحاكاة العددية لموجه موجي يعتمد على الطريقة التكرارية المرتكزة على مفهوم الموجة الكهرومغناطيسية العرضية المعروفة ب (WCIP) اختصاراً ل Wave Concept Iterative procedure بالإنجليزية و ذلك لاستخراج الوسائط S التي تُستخدم بدورها لاستخراج السماحية و النفاذية .

تم تصميم برنامج محاكاة عددية يركز على الطريقة التكرارية باستخدام برنامج MATLAB ، لنمذجة المواد وحساب الوسائط S وكذا استخراج الخواص المطلوبة من : سماحية ، نفاذية ، قرينة إنكسار ...إلخ بطريقتي استرداد مختلفتين.

تنظيم المذكرة

في الفصل الأول، يتم تقديم الخواص الكهرومغناطيسية للمواد عامة وكذا المواد الخارقة وخواصها غير العادية مع تصنيفاتها.

في الفصل الثاني ، يتم تقديم طريقتي استرداد لاستخراج الخواص التأسيسية للمواد الخارقة وكذا عرض مختصر للطريقة التكرارية المستخدمة في المحاكاة لنمذجة نمطين لمادة خارقة داخل بيئة موجه موجي وحساب الوسائط S المستعملة في حساب الخواص التأسيسية.

في الفصل الثالث ، نقوم بتنفيذ برنامج المحاكاة لنموذجي نمط مادة خارقة داخل بيئة موجه موجي مقرون بطريقتي استرداد لحساب الخواص التأسيسية للمادة ومقارنة نتائج طريقتي الاسترداد. أخيراً نختم بخاتمة عامة .

الفصل الأول:

الخواص الكهرومغناطيسية للمواد و المواد الخارقة

1 . الخواص الكهرومغناطيسية للمواد والمواد الخارقة.

1.1.1 مقدمة الفصل الأول

يمكن وصف جميع المواد كهرومغناطيسيا بواسطة سماحياتها المركبة ونفاذيتها المركبة والتي تحدد كيفية استجابة المواد للإشعاع الكهرومغناطيسي . فالمعرفة الدقيقة لهذه الخواص التأسيسية مطلوبا في العديد من التطبيقات ، أما نظريا فيمكن استخراج السماحية و النفاذية من قياسات وسائط الانعكاس و الإرسال وهناك العديد من المشاكل العلمية والصعوبات التي تنشأ أثناء القياس من اجل استخراج هذه الخواص . من جهة أخرى توجد المواد الخارقة التي ما هي إلا مواد مصنعة لها خصائص غير موجودة في مثيلاتها الطبيعية ، كالسماحية السالبة، النفاذية السالبة و قرينة الانكسار السالبة .

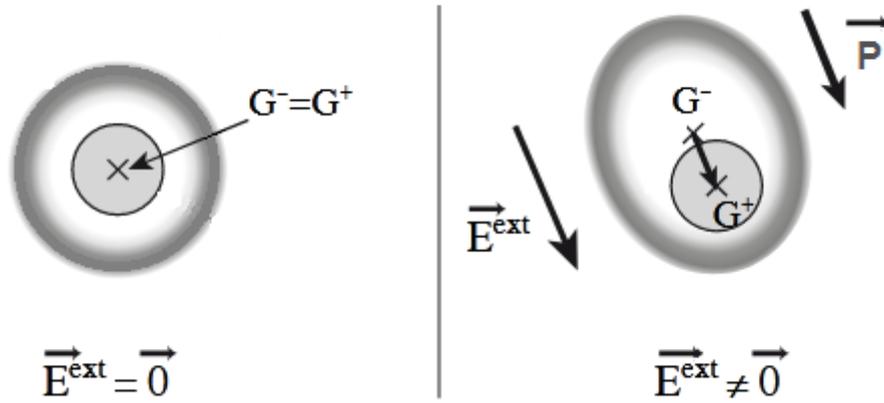
1.2 الخواص الكهرومغناطيسية للمواد

عندما تلتقي الموجات الكهرومغناطيسية مع وسط مختلف عن الفراغ يتم تعديلها عن طريق التفاعل بين الحقول الكهربائية والمغناطيسية الخاصة بالموجة و الحقول الناتجة عن تفاعل الوسط. هذا التفاعل ناتج عن حركة الشحنات المحاصرة في الوسط. تحدث هذه الحركة استجابة للحقل الكهربائي **(الاستقطاب)** أو عن طريق تعديل ثنائيات القطب المغناطيسية الموجودة داخل الوسط تحت تأثير الحقل المغناطيسي **(المغطة)**. على الرغم من أن أسس نظريات الاستقطاب والمغطة تستند إلى أسس كمية ، إلا أنه من الممكن وصفها نوعيا باستخدام المبادئ "الكلاسيكية". هذه المقاربة ستتبع في ما يلي .[1-4]

1.2.1 الاستقطاب.

تحت تأثير حقل كهربائي خارجي \vec{E}_{ext} ، ستخضع الشحنات الموجودة في الوسط لقوة كولوم وتتحرك. يمكن أن يكون هناك نوعان من الشحنات الهيكلية في الوسط. من ناحية ، لدينا الشحنات المتحركة والشحنات الحرة ، القادرة على التحرك عبر مسافات كبيرة مقارنة بالبعد المميز لهيكل الوسط (على سبيل المثال مقياس الشبكة البلورية للهيكل البلوري ، أو طول الوصلات المعدنية في المعدن). تنتمي الإلكترونات الموصلة أو الأيونات "الحرة" إلى فئة الشحنات المتحركة. من ناحية

أخرى ، لدينا الشحنات المربوطة، أي تلك التي لا يمكن أن تتحرك عبر مسافات من ترتيب مقاس الذرة (بضعة أنجستروم Å) ، يتم إزاحتها أيضاً بواسطة الحقل الخارجي. تؤدي حركة هذه الشحنات الداخلية إلى إزاحة مركز النقل للشحنات السالبة G_- بالنسبة لمركز النقل للشحنات الموجبة G_+ ، بينما في حالة عدم وجود الحقل خارجي تتطابق النقطتين (الوسط يكون محايداً). وبالتالي في وجود حقل خارجي تظهر كثافة حجمية لعزم ثنائي القطب \vec{P} ناتجة عن مشاركة كل عزم ثنائي القطب مستحث عن كل شحنة.



شكل 1.1 ظهور عزم ثنائي القطب \vec{P} في وجود حقل كهربائي خارجي

خلاصة يمكن القول أن كثافة عزم ثنائي القطب \vec{P} تساوي صفر عندما $\vec{E}_{ext} = 0$. بمجرد $\vec{E}_{ext} \neq 0$ ، فإن ظهور عزم ثنائي القطب المستحث \vec{P} ينتج تعديلاً للحقل الكهربائي المحيط بإضافة حقل كهربائي للاستقطاب \vec{E}_p إلى الحقل الخارجي. وبالتالي ، يمكن التعبير عن عزم ثنائي القطب المستحث ، والذي يتناسب مع إجمالي المجال الكهربائي بالعلاقة:

$$\vec{P} \propto \vec{E}_{ext} + \vec{E}_p \quad (1.1)$$

تشير هذه المعادلة إلى أن الكثافة الحجمية لعزم ثنائي القطب داخل المادة تنتج فعل مرتد يتم فرض تأثيره إضافة إلى تأثير الحقل الخارجي. ويرتبط عزم ثنائي القطب المستحث داخل الوسط بتوزيع الشحنات الداخلية ρ_{pol} و كذا كثافة تيار الاستقطاب \vec{J}_{pol} من خلال العلاقتين :

$$\rho_{pol} = - \vec{\nabla} \cdot \vec{P} \quad (1.2)$$

$$\vec{J}_{pol} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (1.3)$$

1. 2. 2. المغنطة

تمامًا مثلما تحتوي بعض المواد على شحنات تسمح باستقطابها ، فإن مواد أخرى لديها القدرة على التمغنط. يمكن وجود المغنطة دون وجود أي تأثير خارجي أو مستحث. المغنطة القوية هي ما نعرفه بشكل أفضل لأنه ما يميز المواد المغناطيسية الحديدية المستخدمة في المغناطيس الدائم. وذلك بسبب التفاعل بين الذرات التي تتكون منها المادة وتتعلق بدرجة الحرارة. المغنطة الضعيفة للمواد وهي الأكثر أهمية في البصريات. يرجع المغنطة الضعيفة إلى العزوم الحركية المدارية للإلكترونات بالإضافة إلى سبيناتها الخاصة. تحت تأثير الحقل المغناطيسي المحيط \vec{B}_{ext} ، تميل حلقات التيار الموجودة بشكل طبيعي في المادة إلى التوجه بشكل جماعي في اتجاه تفضيلي ، ينتج عن ذلك الحقل المغناطيسي المستحث \vec{B}_{aim} وتظهر كثافة حجمية لعزم ثنائي القطب المغناطيسي \vec{M} والذي يتناسب مع إجمالي الحقول المغناطيسية بالعلاقة:

$$\vec{M} \propto \vec{B}_{ext} + \vec{B}_{aim} \quad (1.4)$$

ومن جهة أخرى ، فإن تيار المغنطة الحجمية \vec{J}_{aim} ؛ يمكن أن يرتبط بكثافة العزم المغناطيسي بالعلاقة:

$$\vec{J}_{aim} = \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \quad (1.5)$$

1. 2. 3. معادلات ماكسويل Maxwell في المواد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (MG) \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (M\Phi) \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots \dots \dots (MF) \\ \frac{1}{\epsilon_0} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots \dots \dots (MA) \end{array} \right. \quad (1.6)$$

مع قانون إنحفاظ الشحنة

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \dots \dots \dots (CC) \quad (1.7)$$

المعادلات $(M\Phi)$ و (MF) هي المعادلات الهيكلية للحقل ، أي أنها لا تعتمد على كثافة الشحنات ρ أو كثافة التيارات \vec{J} التي تؤدي إلى الحقلين الكهربائي \vec{E} و المغناطيسي \vec{B} . من ناحية أخرى ، تربط المعادلتان (MG) و (MA) الحقول بمصادرها. يتم استنتاج كل هذه المعادلات مباشرة من الشكل المحلي لنظريات الكهرباء الساكنة والمغناطيسية الساكنة. تم تعديل معادلة ماكسويل-أمبير (MA) فقط من خلال إدخال الحد الإضافي $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ و الذي يعبر عن مساهمة ماكسويل.

معادلات ماكسويل في الفراغ تبقى صالحة في المواد. ومع ذلك ، يجب تعديل هذه المعادلات من أجل أن يأخذ بعين الاعتبار جميع الشحنات والمنابع التي أنتجت الحقول الكهربائية و المغناطيسية. في الواقع و كما رأينا سابقاً، يمكن إنتاج الحقول الكهربائية و المغناطيسية داخل وسط تحت تأثير تفاعل الوسط مع الاضطراب الناجم عن الإجراءات الخارجية . وبالتالي فإن الحقول لها مصدر إضافي من حيث التيارات والشحنات المستحثة. لذلك يجب تحديد هذه المعادلات مع الأخذ بعين الاعتبار الشحنات الكلية ρ_{total} و التيارات الكلية \vec{J}_{total} . في المعادلات الهيكلية للحقول الكهربائية و المغناطيسية $(M\Phi)$ و (MF) تبقى كما هي لأنها لا تتضمن منابع. ومع ذلك ، يجب التدقيق أكثر في المعادلتين (MG) و (MA) .

بالنسبة للمعادلة ماكسويل-غوس (MG) الشيء المهم هي الشحنة الكلية

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_{total}}{\epsilon_0} \quad (1.8)$$

$$\rho_{total} = \rho_{libres} + \rho_{liées} = \rho_{libres} + \rho_{pol} \quad \text{مع}$$

حيث يجمع ρ_{libres} الشحنات الموجودة في غياب الاستقطاب. يمكن تعديل معادلة ماكسويل - غوس (MG) بعد ذلك لتصبح:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_{libres}}{\epsilon_0} - \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{p}}{\epsilon_0} \quad (MG) \quad \text{أو} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{libres} \quad \text{مع} \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{p} \quad (1.9)$$

الشعاع \vec{D} هو الانتقال الكهربائي أو الإثارة الكهربائية. وحدتها $[C.m^{-2}]$

بالمثل، بالنسبة لمعادلة ماكسويل-أمبير (MA) ، يجب مراعاة التيارات الكلية:

$$(MA) \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mathbb{2}_0 \left[\vec{J}_{total} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] \quad \text{مع} \quad \vec{J}_{total} = \vec{J}_{libres} + \vec{J}_{liées} = \vec{J}_{libres} + \vec{J}_{pol} + \vec{J}_{aim}$$

حيث \vec{J}_{libres} هو تيار التوصيل المحتمل في الوسط. ، تصبح المعادلة (MA) :

$$(MA) \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mathbb{2}_0 \left[\vec{J}_{libre} + \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} + \vec{\nabla} \wedge \vec{M} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] = \mathbb{2}_0 \left[\vec{J}_{libres} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \right]$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{libres} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{مع} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mathbb{2}_0} - \vec{M} \quad (1.10)$$

الشعاع \vec{H} هو الإثارة المغناطيسية. وحدتها $[A.m^{-1}]$.

يتم التعبير عن معادلات ماكسويل في المواد بالشكل:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{libres} \dots \dots \dots (MG) \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots \dots \dots (M\varphi) \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots \dots \dots (MF) \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{libres} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots \dots \dots (MA) \end{array} \right. \quad (1.11)$$

4.2.1 العلاقات التأسيسية

كما نرى ، فإن الكهرومغناطيسية في الوسائط تتضمن ستة مجاهل $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{D}, \vec{H}, \rho_{libres}, \vec{J}_{libres})$ ولأربع معادلات فقط. من أجل حل هذه المعادلات بطريقة فريدة ، فمن الضروري إدخال فرضيات إضافية. تأتي هذه الفرضيات من العلاقات التأسيسية بين الحقول الكهربائية والمغناطيسية من جهة ، والإثارة الكهربائية والمغناطيسية من جهة أخرى. الفرضيات تجعل من الممكن وصف استجابة الوسط من حيث الاستقطاب و المغنطة حسب المجالات الكهربائية والمغناطيسية المحيطة:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mathbb{2}_0} \quad (1.12)$$

أين ϵ و $\mathbb{2}_0$ هي التوالي سماحية و نفاذية الوسط. ترتبط هذه الكميات على التوالي

بسماحية و نفاذية الفراغ من خلال الحساسية الكهربائية (χ_e) والحساسية المغناطيسية (χ_m)
بالعلاقين التاليين:

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e) \quad \text{و} \quad \mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (1.13)$$

ثم نستنتج التعبيرات التي تصف استجابات الوسط من حيث الاستقطاب والمغطة

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \text{مع} \quad \vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (1.14)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \text{مع} \quad \vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (1.15)$$

مع الأخذ في الحسبان العلاقات التأسيسية ، وبالنظر مؤقتاً إلى أن السماحية والنفاذية لها قيم سلمية و حقيقية (نتحدث عن وسط مثالي) ، فإن معادلات ماكسويل تأخذ الشكل المألوف:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_{libres}}{\varepsilon} \dots\dots\dots (MG) \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (M\Phi) \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (MF) \\ \frac{1}{\varepsilon\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \frac{\vec{j}_{libres}}{\varepsilon} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots\dots\dots (MA) \end{array} \right. \quad (1.16)$$

من معادلات ماكسويل أعلاه ، يمكننا التعبير عن الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ (أي $\rho_{libres} = 0$ و $\vec{j}_{libres} = \vec{0}$ ، مما يعني وسطاً "عازلاً") عن طريق إجراء الاستبدال البسيط:

$$\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon \quad \text{و} \quad \mu_0 \rightarrow \mu \quad (1.17)$$

على وجه الخصوص ، يمكن ملاحظة أن الوسط غير ماص ، وبالتالي شفاف. تتم كتابة سرعة الموجة والممانعة في الوسط على التوالي:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \neq c ; \quad \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

حيث نتذكر أن: $c^2 = \mu_0 \varepsilon_0$ و $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$

من خلال تقديم علاقتي النفاذية النسبية μ_{rel} و السماحية النسبية ϵ_{rel} نحصل على:

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi_e ; \mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m \quad (1.18)$$

في الأخير نتهي بعبارتي قرينة انكسار الوسط وممانعته:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_{rel} \epsilon_{rel}} ; \eta = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_{rel}}{\epsilon_{rel}}} = \eta_0 \frac{\mu_{rel}}{n} = \eta_0 \frac{n}{\epsilon_{rel}}$$

في مادة غير مغناطيسية ، لدينا : $\mu = \mu_0$ أي $\mu_{rel} = 1$ و $\eta = \frac{\eta_0}{n}$

وأخيراً ، يتم التعبير عن شعاع تدفق الطاقة الكهرومغناطيسية ، أو شعاع Poynting $\vec{\Pi}$ ، وكثافة الطاقة الكهرومغناطيسية w بما يلي:

$$\begin{cases} \vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu} = \vec{E} \wedge \vec{H} \\ w = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \end{cases} \quad (1.19)$$

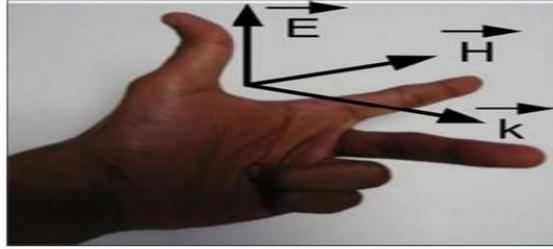
3.1. المواد الخارقة

البحث في المواد الخارقة هو متعدد التخصصات ويشمل مجالات مثل الهندسة الكهربائية ، الكهرومغناطيسية ، فيزياء الحالة الصلبة ، الموجات الدقيقة ، الإلكترونيات الضوئية ، البصريات الكلاسيكية ، علوم المواد ، أشباه الموصلات ، علوم النانو ... إلخ.

المواد الخارقة هي مواد اصطناعية مصممة بحيث تتمتع بخواص لا يمكن العثور عليها في الطبيعة. تدرس البحوث الأولية في المواد الخارقة المواد ذات قرينة الانكسار السالبة. يمكن استخدام المواد ذات قرينة الانكسار السالبة لتصميم عدسات عالية الدقة. في تطبيق آخر ، تم عرض شكل من أشكال "الخفاء" على الأقل في نطاق موجي ضيق بمواد تدرج في القرينة. تتنوع التطبيقات المحتملة للمواد الخارقة وتشمل تطبيقات الفضاء عن بعد ، اكتشاف البنية التحتية ، أجهزة الرادار ذات التردد العالي للسلامة العامة ، العدسات ، الهوائيات ذات الكسب العالي ، لتحسين أجهزة الاستشعار بالموجات فوق الصوتية .. إلخ ،

1.3.1. مقارنة Veselago

الفيزيائي الروسي فيكتور فيزيلاجو Vector veslago ، هو أول من أظهر نظرياً إمكانية الحصول على مواد ذات سماحية سالبة ونفاذية سالبة في وقت واحد [5-7]. اعتبر Veselago أن الموجة الكهرومغناطيسية يمكن أن تنتشر في وسط خطي ومتجانس ومتساوي المناحي يتميز بالسماحية و النفاذية السالبة في آن واحد. باتباع هذه الخصائص ، تسمى هذه المواد بـ مواد اليد اليسرى أو باللغة الإنجليزية "Left Handed Material" المعروفة إختصاراً بالمواد LHM . في المواد العادية يشكل شعاع المجال الكهربائي \vec{E} ، شعاع المجال المغناطيسي \vec{H} وشعاع الموجة \vec{k} معلماً ثلاثياً مباشراً ، بينما بالنسبة للمواد الخارقة فهي تشكل معلماً ثلاثياً غير مباشر و الذي يميز قاعدة اليد اليسرى و منه جاءت التسمية كما هو موضح في الشكل 1.1



شكل 1.1 معلم ثلاثي غير مباشر مبين بواسطة قاعدة اليد اليسرى ل Veselago

وفقاً ل Veselago ، فإن السماحية و النفاذية هما الخاصيتان الأساسيتان اللتان تميزان انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في مثل هذه المواد. وهما الوسيطان اللذان يظهران في معادلات ماكسويل (Maxwell). العلاقة بين شعاع الموجة ونبض موجة أحادية اللون تعطى بالعلاقة التالية:

$$\left| \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{ij} \delta_{ij} - k^2 S_{ij} + k_i k_j \right| = 0 \quad (1.20)$$

أين ϵ_{ij} ، δ_{ij} ، S_{ij} و k_{ij} هي التوالي مركبات السماحية ، النفاذية ، المصفوفة S وشعاع الموجة.

من أجل وسط متساوي المناحي المعادلة (1.20) تصبح

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \quad (1.21)$$

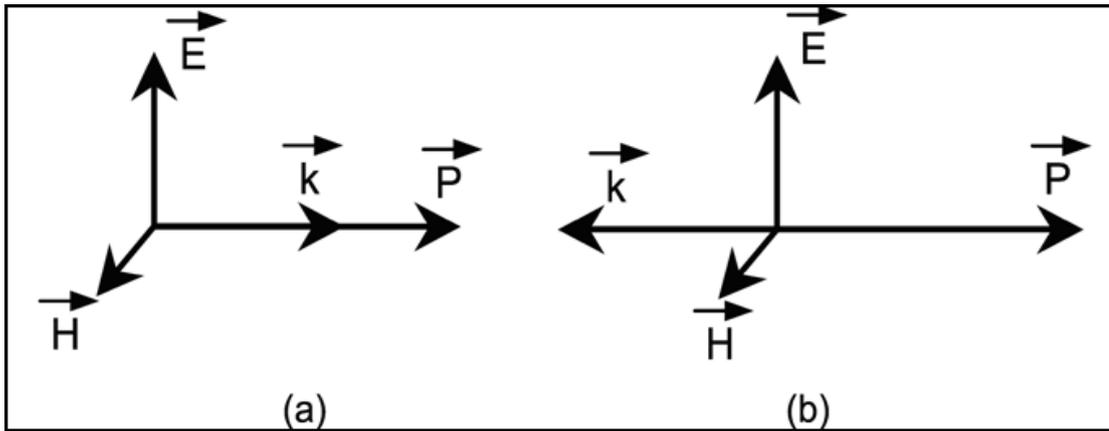
بحيث n يمثل قرينة الانكسار للمادة الذي يعطى بالعلاقة

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (1.22)$$

كما قلنا سابقًا ، في حالة ϵ و μ موجبة ؛ \vec{k} و \vec{H} ، \vec{E} تشكل معلمًا ثلاثيًا مباشرًا وإذا كانتا كلاهما سالبتان فإن الأشعة ؛ \vec{H} ، \vec{E} و \vec{k} في هذه الحالة تشكل معلمًا ثلاثيًا غير مباشر .

$$\vec{k} \wedge \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (1.23)$$

$$\vec{k} \wedge \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (1.24)$$



شكل 2.1 تمثيل معلم ثلاثي بالأشعة. (a) وسط يد يميني. (b) وسط يد يسرى

من بين الخصائص التي يمكن تحديدها أيضًا ، شعاع Poynting $\vec{\pi}$ ، سرعة الطور v_p وسرعة المجموعة v_g بالنسبة للمواد الخارقة ، يكون شعاع Poynting وشعاع الموجة متقابلين كما هو

موضح في الشكل b 1.2

$$\vec{\pi} = \frac{1}{2} \vec{k} \wedge \vec{H}^* \quad (1.25)$$

تكون سرعة الطور وسرعة المجموعة للموجة الكهرومغناطيسية في اتجاهين متعاكسين. بناءً على هذه الخصائص غير العادية ، تتبأ **Veselago** أن هذه الوسائط لها خصائص فريدة مثل:

- عكس تأثير دوبلر L'effet Doppler
- انعكاس إشعاع سيرينكوف. Serenkov.
- عكس قانون سنيل ديكارت Snell Decartes. ومن ثم عندما تمر الموجة من وسط مادة يد يمينى (RHM) إلى وسط مادة يد يسرى (LHM)، سينظر إلى الموجة المرسله على نفس جانب الورود.

2.3.1. السماحية والنفاذية السالبتان

إن قرينة الانكسار هي المعامل الرئيسي في تفاعل الضوء مع المادة. المادة التي لها نفاذية فعالة جزئها الحقيقي سالب مع سماحية فعالة جزئها الحقيقي سالب في آن واحد ($\epsilon_r < 0 ; \mu_r < 0$) دائماً ما يكون لها قرينة انكسار ذات جزء حقيقي سالب . ومع ذلك ، فإن الحالة ($\epsilon_r < 0 ; \mu_r < 0$) تعتبر شرطاً كافياً ، ولكنها ليست شرطاً ضرورياً. يمكن أن تحتوي المادة على قرينة إنكسار سالبة إذا كانت نفاذيتها الفعالة وسماحياتها يمكن أن تستوفي الشرط الضروري التالي $\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r < 0$. وبالتالي ، يمكن أن تكون قرينة الانكسار سالبة حتى إذا كانت النفاذية فقط (أو السماحية) لها جزء حقيقي سالب ، شريطة أن يكون الجزء التخيلي من السماحية (أو النفاذية) كبيراً بما يكفي لجعل ($\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r$) سالباً.

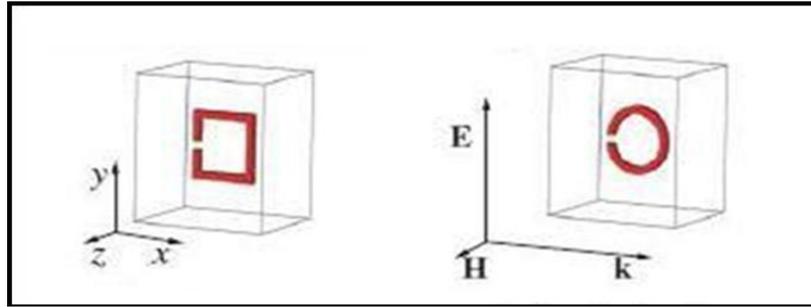
يستنتج مما سبق أعلاه أن هناك نوعان من المواد الخارقة: مادة ذات مؤشر مزدوج سالب المعروفة بالإنجليزية بـ (Double Negative Index) و اختصاراً بمادة (DNI) التي لها جزء حقيقي سالب لكل من السماحية و النفاذية. من ناحية أخرى مادة ذات مؤشر سالب وحيد المعروفة بالإنجليزية بـ (Single Negative Index material) و إختصاراً بمادة (SNI) لها جزء حقيقي سالب واحد فقط إما للسماحية أو النفاذية وليس الاثنين في آن واحد.

في جميع المواد البصرية SNI المذكورة في الأدبيات ، يكون الجزء الحقيقي من السماحية سالباً ، في حين أن الجزء الحقيقي من النفاذية موجبا [8].

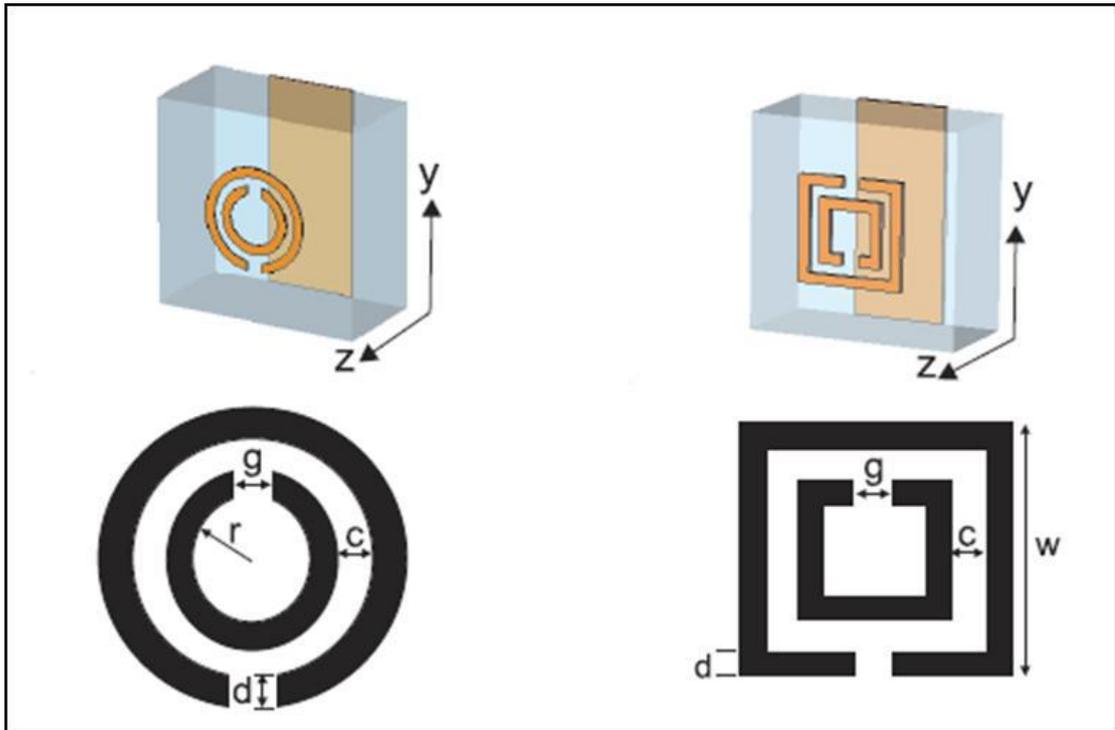
3.3.1. النفاذية السالبة.

في عام 1999 ، بيندري وآخرون [9] اقترح أنواعًا مختلفة من الرنانات ذات الحلقة بشق المعروفة باللغة الإنجليزية ب (Split Ring Resonator) و إختصارا ب "SRR" و ذلك في عدة أشكال هندسية (مربعة ، دائرية ، أوميغا ، ...) ، تتمتع هذه الهياكل بالقدرة على تقديم نفاذية سالبة في نطاق تردد محدد جيدا ولديه استجابة مماثلة للمواد المغناطيسية.

وفقًا للدراسات التي أجراها كافي ساكي (Kafesaki.M) ، وآخرون (2005) [10] ، يمكن الحصول على الرنين المغناطيسي مع النفاذية السالبة باستخدام ال SRRs في حلقات مفردة أو مزدوجة. يوضح الشكل 3.1 الشكل المربع والدائري ل SRRs مع حلقة واحدة في الهواء. يوضح الشكل 4.1 هندسة ال SRRs في حلقات مزدوجة

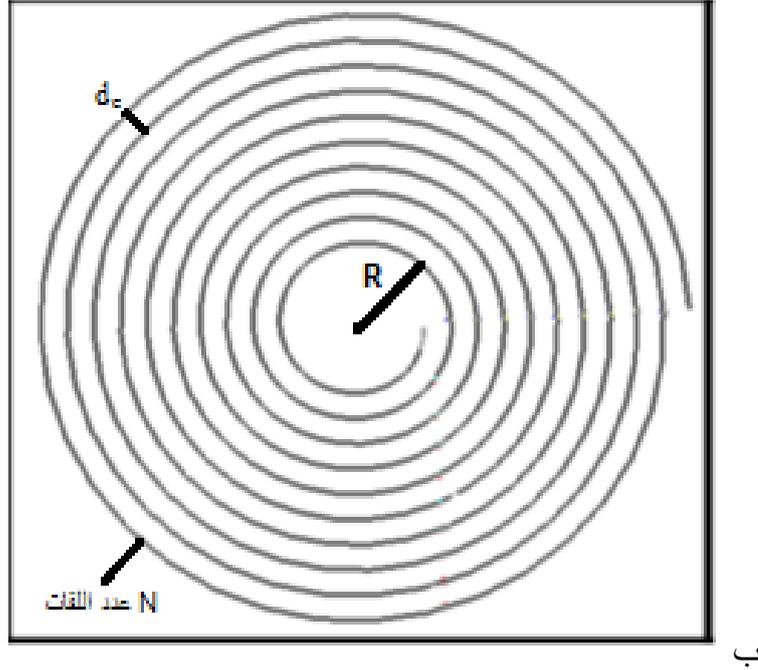


شكل 3.1 المرينات SRR بحلقة واحدة



شكل 4.1 المريناتات SRR بحلقتين

في عام 1999 ، قدم بيندري بنية جديدة تسمح بإنشاء وسائط غير مغناطيسية مع استجابة مغناطيسية [9] ، والهيكل الجديد هو "الاسطوانة السويسرية أو suisse roll" المعروضة في شكل 1.5. الاسطوانة السويسرية هي مجموعة من اللوالب ، يتم لف كل لولب على أسطوانة نصف قطرها R . يتم عزل اللوالب الموصلة ب N لفة وتباعد اللفات بمسافات d_c . هيكل الأسطوانة السويسرية عبارة عن هيكل معدني اصطناعي يتميز باستجابة مغناطيسية في غياب المكون المغناطيسي ، في الواقع ، عندما يطبق مجال مغناطيسي على طول محور الأسطوانة ، يتم إحداث تيار في الموصل ، وبالتالي ، يتم إنشاء سعة (مكتفة) كاملة التي ترن منها الدارة الكهربائية وتقل التيار.



شكل 1.5 الأسطوانة السويسرية المقدمة من طرف [9] Purdry

يمكن تحديد النفاذية الفعالة لمثل هذا الهيكل بناءً على عمل [9] Pendry et al.

بالعلاقة:

$$\epsilon_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega R \epsilon_0} \frac{d_c c_0^2}{2\pi^2 R^3 (N-1)}} \quad (1.26)$$

c_0 سرعة الضوء في الفراغ و ω النبض الزاوي. σ هو ناقلية التلغيف ، والعازل بين الطبقات الموصلة لديه السماحية ϵ . يمثل F معدل ملء المادة الفعالة. لذلك ، يتم إعطاء النفاذية بالعلاقة التالية:

$$\epsilon_{eff} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \quad (1.27)$$

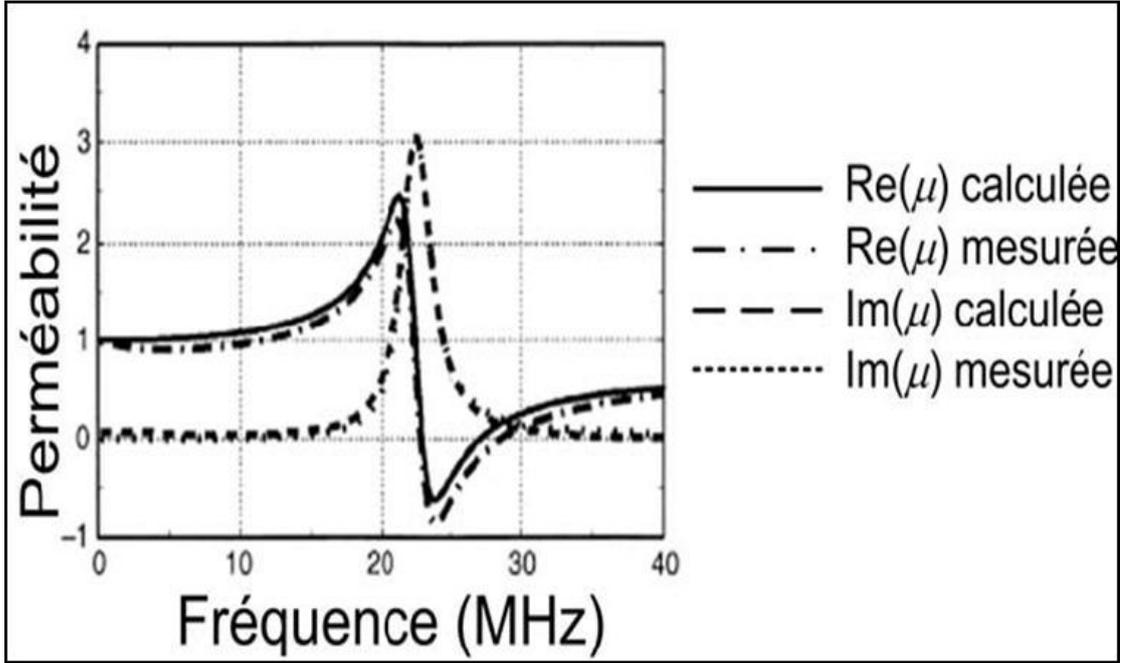
حيث يعطى نبض الرنين بواسطة:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{d_c c_0^2}{2\pi^2 R^3 (N-1)}} \quad (1.28)$$

و يتم إعطاء تخميد الرنين بالعلاقة التالية:

$$\Gamma = \frac{2\sigma}{\omega R \mu_0 (N-1)} \quad (1.29)$$

يوضح الشكل 1.6 نتائج القياسات والمحاكاة للنفاذية الفعالة لهيكل اللفة السويسرية.



الشكل 6.1 النفاذية محسوبة و مقاسة بدلالة التواتر لهيكل أسطوانة سويسرية ذات 35 لفة [11]

الأسطوانة السويسرية لها تجاوب (رنين) فقط للمجال المغناطيسي المطبق على طول محور الأسطوانة ولها الجزء الحقيقي للنفاذية سالب في نطاق التردد حول 23 GHz. بالإضافة إلى ذلك ، عندما يكون المجال الكهربائي موازياً للأسطوانات ، فإن هيكل الأسطوانة لديه امتصاص للموجات العرضية الواردة.

4.3.1. السماحية السالبة.

تناولت العديد من الأعمال في المجالات الضوئية والأشعة تحت الحمراء والكهرومغناطيسية الوسائط ذات السماحية الفعالة السالبة ، وهي خاصة مستوحاة إلى حد كبير من فيزياء البلازما.

أظهر بيندري وفريقه أن شبكة من السيقان المعدنية المتوازية ذات نصف القطر r ودورية a لها استجابة كهرومغناطيسية مشابهة لاستجابة البلازما منخفضة الكثافة [12]. ينتج عن هذا السلوك عدة عوامل ، مثل كتلة وشحنة الإلكترونات التي تظهر في الهياكل المعدنية بتردد عالٍ جداً. يعمل تطبيق حقل مثل قوة إرجاع على الشحنات وتؤدي إلى حدوث ظاهرة تذبذب (اهتزاز) يتم الحصول عليها عندما يكون تواتر الإثارة مساوياً لتردد البلازما المحدد بواسطة:

$$f_p^2 = \frac{nq^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_{\text{eff}}} \quad (1.30)$$

حيث q تمثل الشحنة العنصرية لكل إلكترون ، n هي كثافة الإلكترونات في الوسط ، و m_{eff} الكتلة الفعالة للإلكترونات ، و ϵ_0 سماحية الفراغ. نلاحظ أنه لا يمكن تحديد السماحية البلازمية إلا لقيم التواتر الأقل من تردد البلازما.

يتم إعطاء تشتت السماحية البلازمية بالعلاقة التالية:

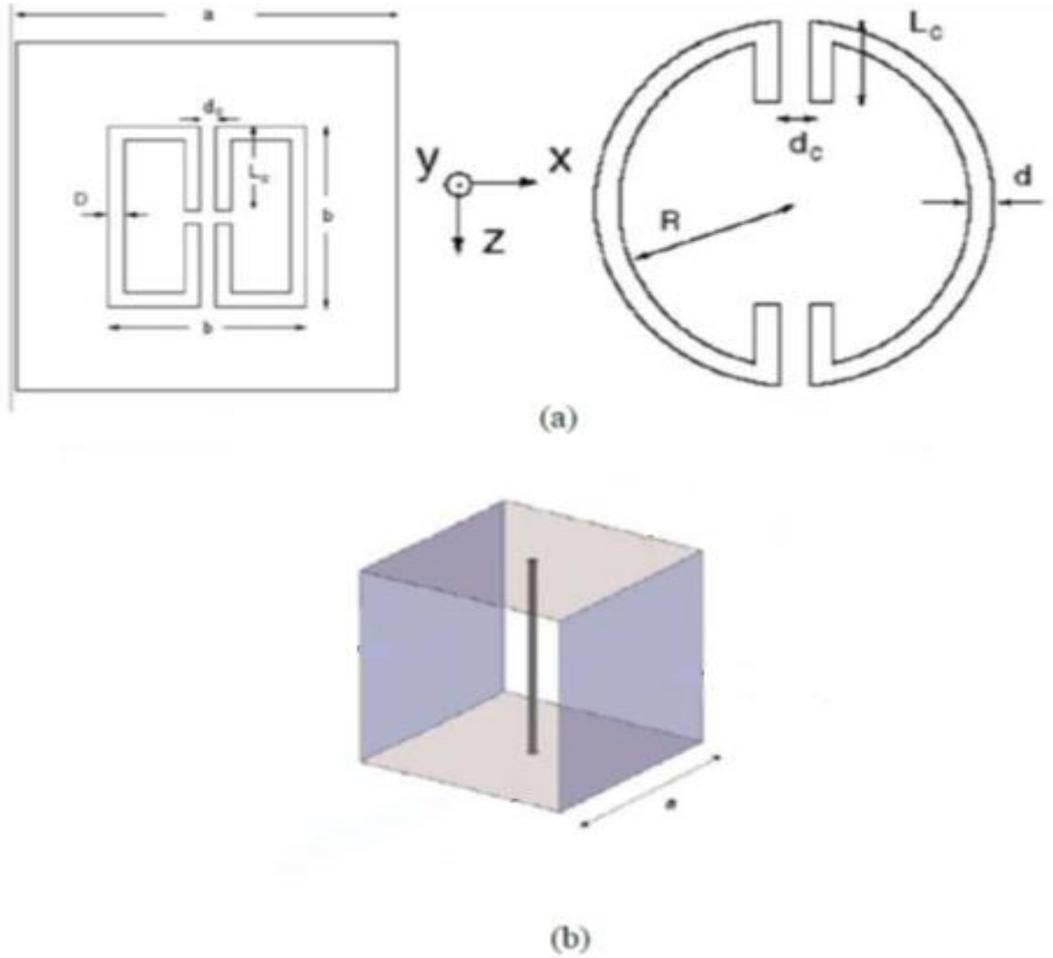
$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.31)$$

حيث يتم إعطاء تواتر البلازما بواسطة:

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} \quad (1.32)$$

مع e شحنة الإلكترون و m_{eff} هي الكتلة الفعالة للإلكترون.

يوضح الشكل 7.1 بعض الأمثلة على الهياكل ذات السماحية السلبية.



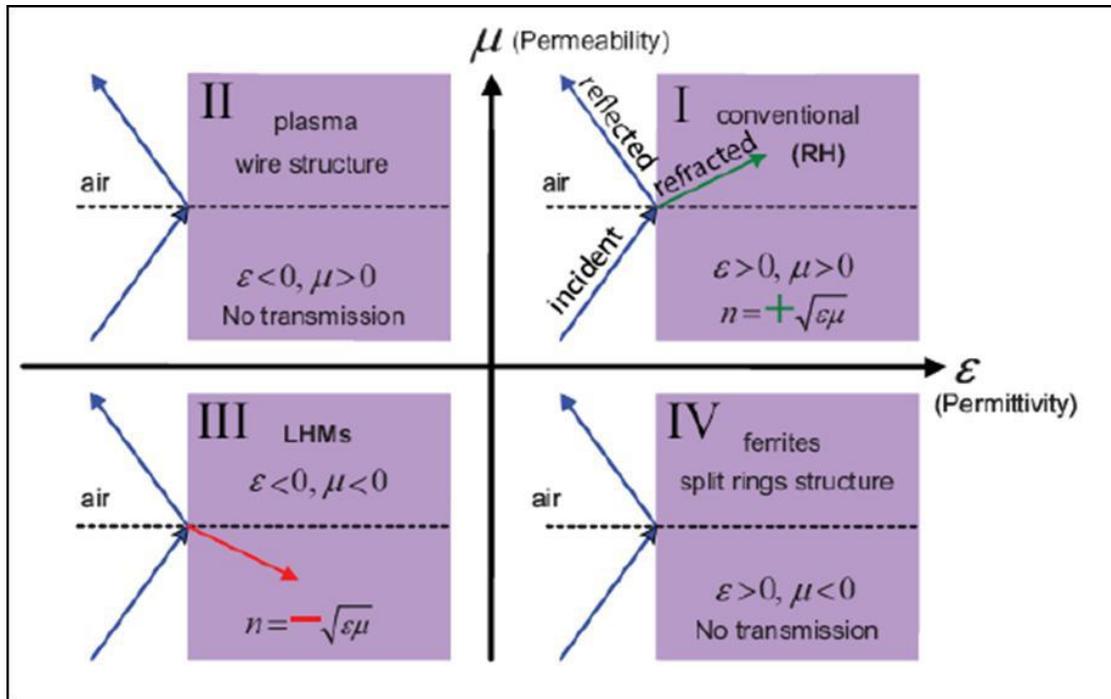
شكل 7.1 الهياكل ذات السماحية السالبة. (a) مرنان C الذي اقترحه O'Brin [13]. (b) ساق معدنية.

إن أكبر إمكانات المواد الخارقة هو إمكانية إنشاء هيكل بقرينة انكسار سالبة ، حيث لا توجد هذه الخاصية في أي مادة غير اصطناعية. تقريبا جميع المواد التي يتم العثور عليها في البصريات ، مثل الزجاج أو الماء ، لها قيم إيجابية للسماحية ϵ والنفاذية μ في كل مرة. ومع ذلك ، فإن العديد من المعادن (مثل الفضة والذهب) لها سماحية سالبة عند الأطوال الموجية المرئية. المادة التي تحتوي على μ أو ϵ (و ليس كلاهما) سالب تكون معتمدة بالنسبة للإشعاعات الكهرومغناطيسية.

5.3.1. قرينة الانكسار السالبة

المواد الخارقة هي مواد اصطناعية غير موجودة في الطبيعة ويتم تصنيعها بطبقة محددة. حتى هذا الوقت ، لا توجد مواد لها سماحية و نفاذية سالبتين في آن واحد.

يتم تحديد الخواص الكهربائية والمغناطيسية للمواد الخارقة من خلال خاصيتين مهمتين للمادة ، السماحية العازلة التي يمكن الحصول عليها عن طريق شبكة من الأسلاك المعدنية والنفاذية المغناطيسية التي يمكن الحصول عليها عن طريق المرنانات ذات الحلقة بشق SRR . إن النفاذية " μ " والسماحية " ϵ " تجعل من الممكن تحديد استجابة المادة للمجال الكهرومغناطيسي. بشكل عام ، ϵ و μ كلاهما إيجابي في المواد العادية. ومع ذلك ، بالنسبة لبعض الهياكل ، والتي تسمى مواد اليد اليسرى (LHM) ، فإن السماحية الفعالة ، ϵ_{eff} و النفاذية ، μ_{eff} لها قيم سالبة. في مثل هذه المواد ، يكون مؤشر الانكسار ، n ، أقل من الصفر ، ويمكن الحصول عليه عن طريق تجميع شبكة من الأسلاك المعدنية و مرنانات الحلقة ذات الشق SRR [14-15]



شكل 8.1 تصنيف المواد حسب إشارات نفاذيتها و سماحيته

4.1. خاتمة الفصل الأول

تمثلت الدراسة المقدمة في هذا الفصل في التذكير بأهم العلاقات التي تحكم الخواص الكهرومغناطيسية للمواد في وجود تأثيرات خارجية و في غيابها. ركزنا على ظاهرتي الاستقطاب و المغنطة و أيضا معادلات ماكسويل التي تعبر بشكل دقيق عن خصائص المواد في ظل انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية فيها، ثم عرجنا على مدخل إلى المواد الخارقة التي ما هي إلا مواد مصنعة لها خصائص غير موجودة في مثيلاتها الطبيعية ، كالسماحية السالبة، النفاذية السالبة و قرينة الانكسار السالبة. في الأخير تطرقنا إلى تصنيفات المواد الخارقة من مواد اليد اليسرى (LHM)، مواد ذات مؤشر سلبي مزدوج (DNI) و مواد ذات مؤشر سلبي وحيد (SNI) .

الفصل الثاني:

طرق الاسترداد لتخصيص المواد

1.2 . مقدمة

في هذا الفصل نقدم مختصرا لطريقة المحاكاة الكهرومغناطيسية المعروفة بللطريقة التكرارية (WCIP) (Wave Concept Iterative Procedure) التي تركز على مفهوم الموجة العرضية من أجل محاكاة نمطي مادة خارقة لاستخراج الوسائط S لكل نمط. ال برمجية المصممة على أساس الطريقة التكرارية (WCIP) عدلت بإضافة طريقتي استرداد للخواص التأسيسية من نفاذية μ ، سماحية ϵ و قرينة انكسار n ، عمليا الطريقتان تستعملان الوسائط S المقاسة . طريقة الاسترداد الأولى (NRW) و هي الأقدم ، إقترحها Nickolson & Ross يتم فيها تحديد السماحية المركبة والنفاذية المركبة للمواد الخطية بشكل عام في المجال التواتري بواسطة قياسات في المجال الزمني الأوحد. في عام 2004 إقترح Xudong Chen طريقة الاسترداد الثانية المحسنة لاسترداد الخواص التأسيسية الفعالة (السماحية والنفاذية) لشريحة من مادة خارقة انطلاقا من قياسات للوسائط S.

2.2 . تقديم طريقة المحاكاة : الطريقة التكرارية (WCIP) [16-17]

1.2.2 . الدراسة النظرية للطريقة Wcip

من أجل التعبير عن العلاقات الرياضية للطريقة التكرارية (wcip) فرض وسطين مختلفين مميزين ب ϵ_{r1} و ϵ_{r2} موصولين بسطح Ω ذات سمك مهمل تتوضع عليه الدارة المدروسة .

إنطلاقا من [17] تعرف الحقول الكهرومغناطيسية العرضية في المستويات المرجعية

Ω_1 و Ω_2

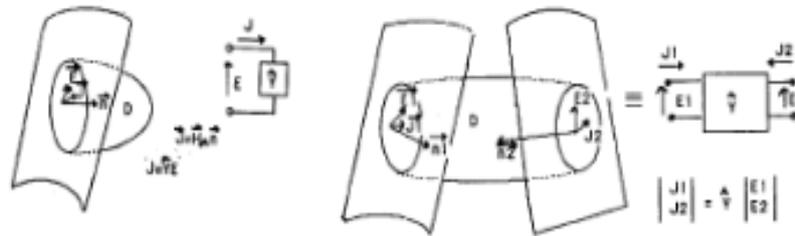


Fig.2a: One -port

Fig.2b: Two -port.

Fig.2a: One -port

Fig.2b: Two -port.

الشكل 1.2 . صورة توضيحية لأشعة الحقول [17]

مفهوم الموجة يتعلق بالتعبير عن المتغيرات الكهرومغناطيسية للحقل الكهربائي وشدة التيار انطلاقاً من الأمواج الواردة والمنعكسة على السطح Ω . حيث تعطى كثافة التيار الكهربائي بالجاء الشعاعي التالي :

$$\vec{J} = \vec{H} \wedge \vec{n} \quad (2.1)$$

\vec{n} : شعاع الوحدة الناظم لـ Ω ، موجه من سطح الى الوسط Ω_i $i=1,2$

\vec{H} : الحقل المغناطيسي العرضي

الأمواج الواردة والمنعكسة على السطح Ω يعبر عنها بالعلاقات التالية:

$$\vec{A}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (\vec{E}_i + Z_{0i} * \vec{H}_i \wedge \vec{n}) \quad (2.2)$$

$$\vec{B}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (\vec{E}_i - Z_{0i} * \vec{H}_i \wedge \vec{n}) \quad (2.3)$$

يعبر أيضاً عن سعة الأمواج الواردة \vec{A}_i والمنعكسة \vec{B}_i في مساحة السطح Ω_i بدلالة الحقول الكهربائية وكثافة التيار بالعلاقات التالية:

$$\vec{A}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (\vec{E}_i + Z_{0i} \vec{j}_i) \quad (2.4)$$

$$\vec{B}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_{0i}}} (\vec{E}_i - Z_{0i} \vec{j}_i) \quad (2.5)$$

العبارات التحليلية للحقل الكهربائي \vec{E}_i وكثافة التيار \vec{j}_i معرفة انطلاقاً من العلاقتين (2.5) و (2.4) ب:

$$\vec{E}_i = \sqrt{Z_{0i}} (\vec{A}_i + \vec{B}_i) \quad (2.6)$$

$$\vec{j}_i = \frac{1}{\sqrt{Z_{0i}}} (\vec{A}_i - \vec{B}_i) \quad (2.7)$$

Z_{0i} : الممانعة الذاتية للوسط i تعطى عباراتها التحليلية بالعلاقة :

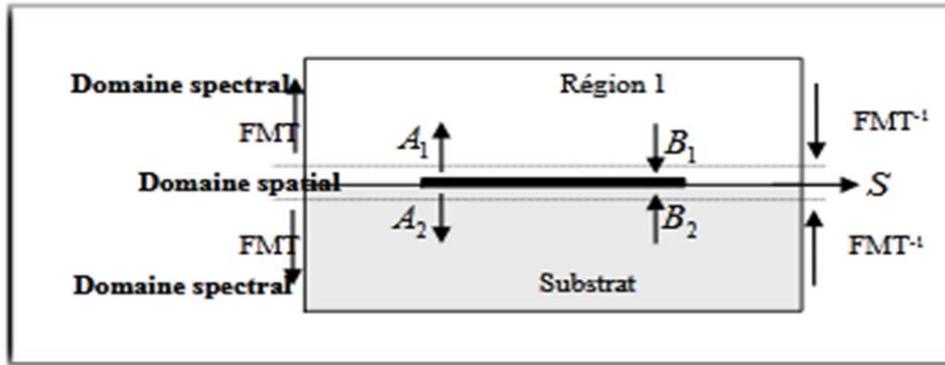
$$Z_0 = \eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \text{ و } Z_{0i} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_{ri}}}$$

مع Z_0 تمثل ممانعة الفراغ

ε_{ri} تمثل سماحية العزل النسبية للوسط : i

2.2.2 مبدأ الطريقة التكرارية wcip

الطريقة التكرارية (wave concept iterative procedure) المعروفة إختصاراً ب (WCIP) هي طريقة تعتمد على مفهوم الموجة العرضية وتعتمد خصوصاً على الإستخدام الدوري للأوساط المكانية و الطيفية بطريقة منظمة [18-20] .



الشكل 2.2 مبدأ الطريقة التكرارية - wcip [19]

يعتمد مبدأ هذه الطريقة في تكرار المعادلات المقترحة إلى غاية الحصول على حلول المشكل المطروح لذلك يجب أن تكون كل المعادلات مرتبطة ببعضها وحل المعادلة الأخيرة يصبح معطى للمعادلة التالية : نفرض في بداية الطريقة التكرارية أن الهدف معزول في الوسط الحر وتتواجد سوى الأمواج النسبية الناتجة عن التحريض المولد للأمواج الواردة A_1^0 و A_2^0 في مستوى السطح Ω . تعطي هذه الموجة بالانعكاس على الأسطح العلوية والسفلية للعملية أمواج جديدة B_1^1 و B_2^1 حيث تمثل الأمواج المنعكسة للعملية الاولى . هذه الأخيرة تتعرج في الوسط الحر لإعطاء أمواج واردة تعرف بـ A_1^1 و A_2^1 . لتغذية الأمواج الواردة للعملية المقبلة وتكرر العملية التكرارية إلى غاية N عملية . يلخص المبدأ السابق بالمعادلات الأساسية التالية

$$\vec{B}_i = \hat{\Gamma} \vec{A}_i \quad (2.8)$$

في الميدان الطيفي

$$\vec{A}_i = \hat{S} \vec{B}_i + \vec{A}_{0i} \quad (2.9)$$

في الميدان المكاني

\hat{S} : مؤثر الانعراج يعرف في الميدان المكاني (على مستوى السطح العازل) يربط الأمواج الواردة بالأمواج المنعكسة. يعبر عن الشروط الحدودية ومعادلة الاستمرارية في مختلف الأوساط المشكلة لسطح البنية Ω .

$\hat{\Gamma}$: مؤثر الانعكاس يعرف في الميدان الطيفي يربط الأمواج المنعكسة بالأمواج الواردة. يعبر عن طبيعة جدران العلبه والعازل الموجود في مختلف أوساط البنية.

الطريقة التكرارية تمكن المرور بين الميدان المكاني والميدان الطيفي للمرور من ميدان لآخر نستخدم Fast Modal Transform (FMT) ومعاكسه

FMT عبارة عن تحويل فورية معدل نمطيا يسمح بالمرور من الميدان المكاني إلى الميدان التواتري.

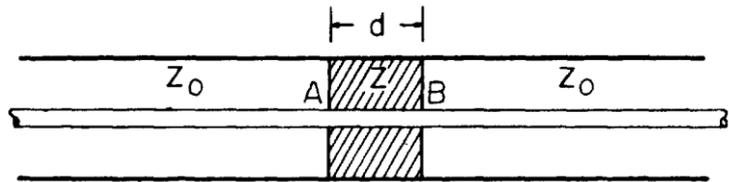
3.2 تقديم المعادلات النظرية لطريقتي الاسترداد

2.3.1 طريقة NRW [21,22]

المبدأ الأساسي:

يفرض قرص حلقي من مادة معينة ذات نفاذية $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ، سماحتها $\mu = \mu_0 \mu_r$ وسمكها d ، مثبت في خط محوري (coaxial cable) مملوء بالهواء مع مقاومة مميزة Z_0 كما هو مبين في الشكل

2.1 . داخل المنطقة $0 \leq x \leq d$



الشكل 2.1 خط محوري مع قرص حلقي من المادة المراد قياس خصائصها

سوف يفترض للخط مقاومة جديدة مميزة $Z = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \cdot Z_0$ ، حيث قد تكون ϵ_r و μ_r مركبة إذا كانت

d لانتهائي ، ثم معامل الانعكاس لورود موجة على واجهة الخط المملوء بالهواء قد تعطى ببساطة بالعلاقة

$$\Gamma = \frac{z-z_0}{z+z_0} \quad (2.10)$$

بالنسبة ل d محدود ، يمكن كتابة معامل الإرسال بين الوجهين A و B للشريحة بالعلاقة

$$T = e^{-i\omega\sqrt{\epsilon_r}.d} = e^{-i\left(\frac{\omega}{c}\right)\sqrt{\epsilon_r}\epsilon_r.d} \quad (2.11)$$

يمكن الحصول على وسائط الإرسال و الانعكاس بالعلاقات التالية:

$$S_{11} = \frac{(1-T^2)\Gamma}{1-\Gamma^2T^2} \quad (2.12)$$

$$S_{21} = \frac{(1-\Gamma^2)T}{1-\Gamma^2T^2} \quad (2.13)$$

كتابة المجموع و الفرق لوسائط معاملات الانتشار

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (2.14)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (2.15)$$

إذا وضعنا

$$X = \frac{1-V_1V_2}{V_1-V_2} \quad (2.16)$$

ثم نستطيع تبين أن Γ يمكن الحصول عليه من معاملات التشتت

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (2.17)$$

واختيار الإشارة يكون بالشرط $|\Gamma| \leq 1$ ، أيضا يمكن كتابة

$$T = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1\Gamma} \quad (2.18)$$

ثم من العلاقة (2.10) نعرف القيمة

$$\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)^2 = c_1 \quad (2.19)$$

و من العلاقة (2.11) نعرف القيمة

$$\Gamma_r \varepsilon_r = - \left\{ \frac{c}{\omega d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right\}^2 = c_2 \quad (2.20)$$

و أخيرا نحصل على

$$\Gamma_r = \sqrt{c_1 c_2} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_r = \sqrt{c_2 / c_1} \quad (2.22)$$

وبالتالي تم الحصول على النفاذية المركبة والسماحية المركبة من قياس وسائط تشتت الانعكاس و الإرسال لشريحة من المادة المراد تخصيصها.

1.3.2 طريقة CHEN [23]

من أجل استعادة السماحية والنفاذية الفعاليتين لشريحة من المادة الخارقة ، نحتاج إلى وصفها بأنها شريحة متجانسة وفعالة. في هذه الحالة ، يمكننا استرداد السماحية والنفاذية من بيانات وسيط الانعكاس S_{11} وبيانات وسيط الإرسال S_{21} الناتجة عن ورود موجة مستوية عمودية على الشريحة المتجانسة من المادة الخارقة ذات سمك d . وسيط الانعكاس S_{11} يساوي معامل الانعكاس أما وسيط الإرسال S_{21} مرتبط بمعامل الإرسال T بواسطة العلاقة:

$$S_{21} = T e^{ik_0 d} \quad (2.23)$$

حيث يشير k_0 العدد الموجي للموجة للواردة في الفراغ (الفضاء الحر).

الوسائط S متعلقة بقرينة الانكسار n و الممانعة Z بالعلاقات التالية:

$$S_{11} = \frac{R_{01} (1 - e^{i2nk_0 d})}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0 d}} \quad (2.24a)$$

$$S_{21} = \frac{(R_{01} - 1) e^{i2nk_0 d}}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0 d}} \quad (2.24b)$$

$$R_{01} = \frac{z-1}{z+1} \quad \text{مع}$$

يتم الحصول على معامل الانكسار n والممانعة Z عن طريق عكس المعادلات (2.24a) و (2.24b) ، فنحصل على:

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2.25a)$$

$$e^{i2nk_0d} = X \pm i\sqrt{1 - X^2} \quad (2.25b)$$

حيث

$$X = \frac{1}{2S_{21}(1-S_{11}^2+S_{21}^2)}$$

مع اعتبار المادة الخارقة وسط غير نشيط ، تحدد الإشارات في المعادلات السابقة بالشروط التالية

$$z' \geq 0 \quad (2.26a)$$

$$n'' \geq 0 \quad (2.26b)$$

حيث تشير (.) و (.)' إلى الجزء الحقيقي والجزء التخيلي على التوالي.

قيمة قرينة الانكسار n يمكن يتم تحديدها من المعادلة (2.25b)

$$n = \frac{1}{k_0d} \left\{ \left[\ln(e^{ink_0d}) \right]'' + 2m\pi \right\} - i \left[\ln(e^{ink_0d}) \right]' \quad (2.27)$$

حيث m هو عدد طبيعي مرتبط بمؤشر فرع n' كما ذكر أعلاه ، يتم تحديد الجزء التخيلي لـ n بشكل فريد ، ولكن الجزء الحقيقي معقد بواسطة فروع دالة اللوغاريتم. يمكن تطبيق المعادلتين (2.25a) و (2.25b) بشكل مباشر في حالة لوح متجانس يتم تحديد حدود اللوح بشكل جيد و الوسائط S تعرف بدقة.

ترتبط السماحية (ε) والنفاذية (μ) بقرينة الانكسار والممانعة بالعلاقات التالية:

$$\varepsilon = \frac{n}{z} \quad (2.28)$$

$$\mu = n \cdot z \quad (2.29)$$

4.2. خاتمة الفصل الثاني

تمثلت الدراسة المقدمة في هذا الفصل بتقديم مختصرا للطريقة التكرارية (WCIP) في تذكير بأهم العلاقات التي تحكم الخواص الكهرومغناطيسية للمواد في وجود تأثيرات خارجية و في غيابها. ركزنا على ظاهرتي الاستقطاب و المغنطة و أيضا معادلات ماكسويل التي تعبر بشكل دقيق عن خصائص

المواد في ظل انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية فيها، ثم عرجنا على مدخل إلى المواد الخارقة التي ما هي إلا مواد مصنعة لها خصائص غير موجودة في مثيلاتها الطبيعية ، كالسماحية السالبة، النفاذية السالبة و قرينة انكسار سالبة. في الأخير تطرقنا إلى تصنيفات المواد الخارقة من مواد اليد اليسرى (LHM) ، مواد ذات مؤشر سلبي مزدوج (DNI) و مواد ذات مؤشر سلبي وحيد (SNI) .

الفصل الثالث:

نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج
خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة
التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

3 . 1 مقدمة الفصل الثالث

يمثل توصيف المكونات الإلكترونية ونمذجتها وتحسينها قبل تصنيعها تحديًا كبيرًا للمصنعين. أصبح استخدام المحاكيات شائعًا خلال جميع مراحل التصنيع من أجل تجنب أي شذوذ في المنتج النهائي وإجراء التصحيحات اللازمة من خلال البحث عن الخصائص المثلى المتوقعة من المكون عند دمجها في وسطه النهائي.

في مجال النمذجة والمحاكاة الكهرومغناطيسية ، يقوم الباحثون في دوائر الموجات الدقيقة حاليًا بإجراء أبحاث نشطة لتطوير أجهزة المحاكاة الكهرومغناطيسية العامة وتطوير النمذجة الكهرومغناطيسية متعددة المقاييس. في هذا الفصل ، سنستكشف الطريقة التكرارية (WCIP) من خلال تطبيقها لنمذجة ومحاكاة بنيتين مستويتين لنمطي مادة خارقة الأول يمثل المرنان ذو الحلقة يشق و الثاني يمثل شبكة سيقان معدنية .

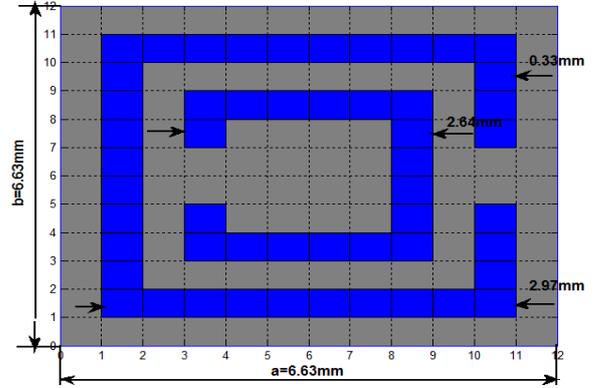
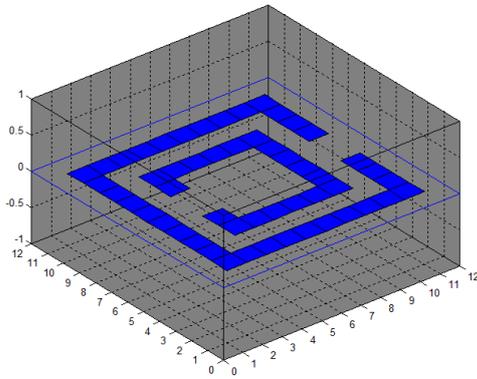
هيكل الدراسة عبارة عن دائرة مستوية ، بطبقة وحيدة ، متكون من دعامة رقيقة عازلة ، يوضع عليها هيكل من طبقة معدنية رقيقة لنمطي مادة خارقة حيث يتم تغذية الدارة بواسطة خط عصابة رقيقة ، يتم إنتاج الكتلة عن طريق تعدين الجانب الآخر من الدعامة. كما يتم وضع هذه الدارة في علبة معدنية كما هو موضح في الشكل 1.3

3 . 2 . دراسة بالمحاكاة للعناصر المكونة للمواد الخارقة

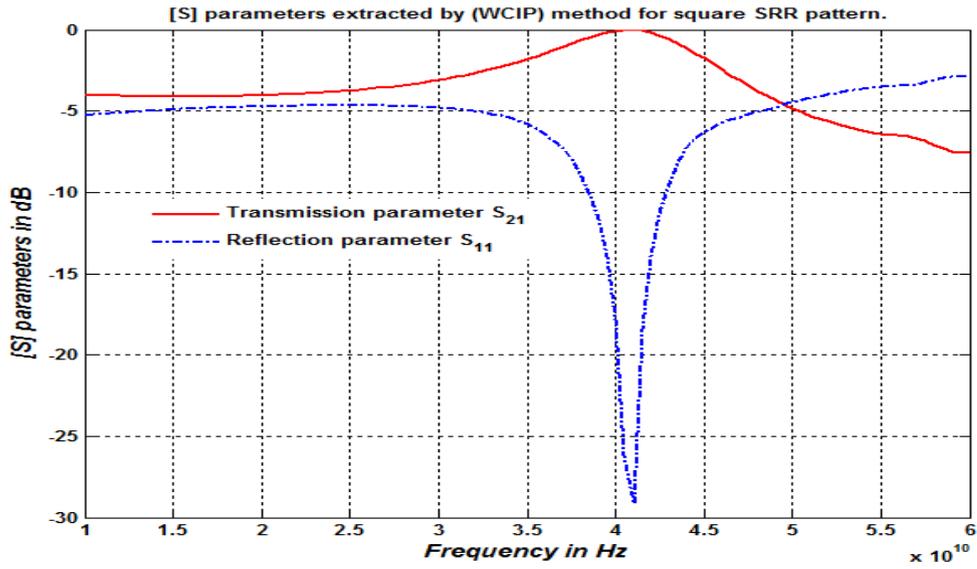
3 . 2 . 2 المرنانات ذات الحلقة بشق (SRR)

في هذا الجزء ، سنهتم بدراسة المرنان ذو الحلقة بشق المربع (SRR) ، ويتم تخصيصه للاشتغال في النطاق [38GHz-43GHz]. يتكون هذا المرنان من النحاس المترسب على ركيزة عازلة من نوع ROGERS RO4003C ، ويتميز بالسماحية 3.38. يكون إطار SRR المدروس على الجانب الخارجي يساوي 3.63mm ، وعرض المسار 0.3025mm ، والقطع في أحد هذه الجوانب به فجوة ب 0.605mm. الحلقات متحدة المركز وتباعدهما بفارق 0.3025mm .

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

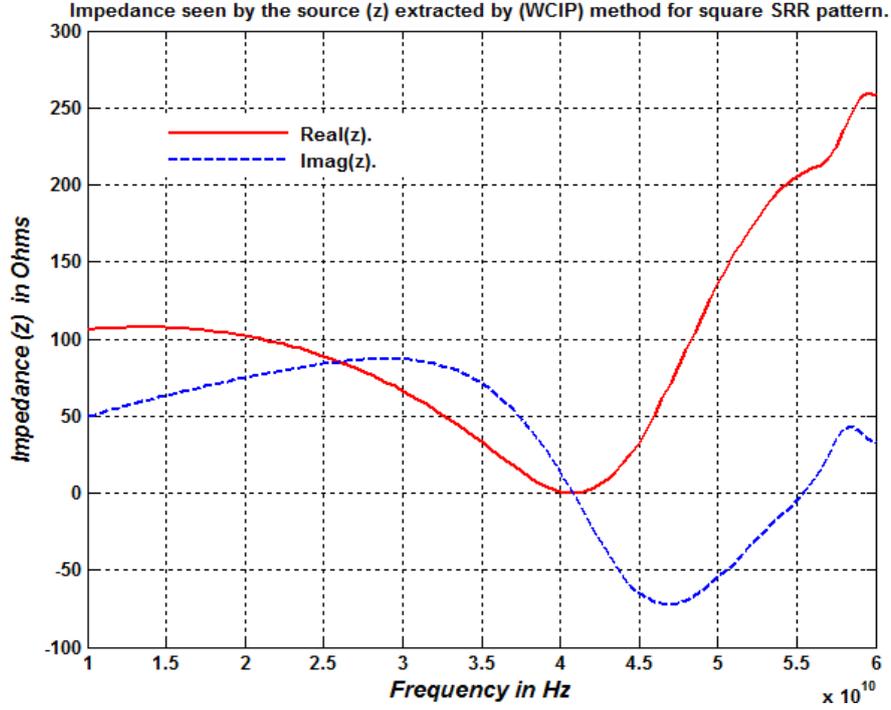


شكل 1.3 تمثيل و أبعاد المرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع في موجه موجي مستطيل



شكل 2.3 تغيرات سعات وسائط الإرسال و الإنعكاس S_{21} و S_{11} بدلالة التواتر للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

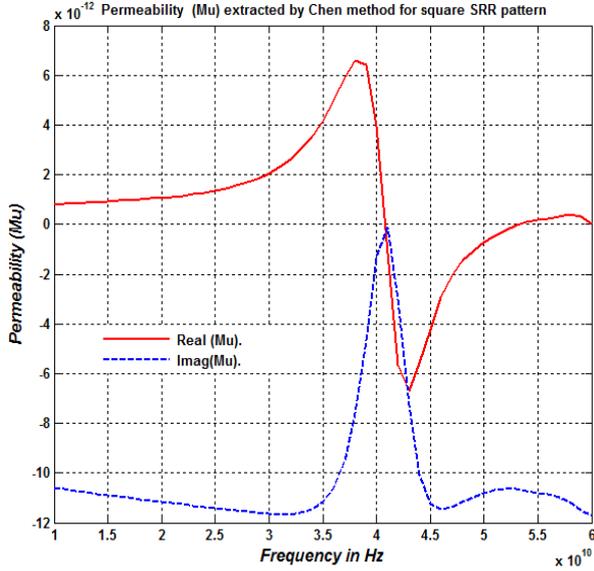


شكل 3.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي الممانعة المرئية من المنبع (z) بدلالة التواتر للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع

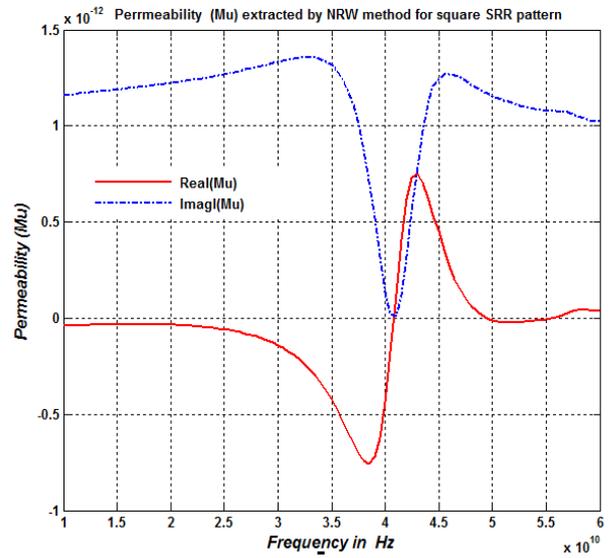
يمثل الشكل 2.3 معاملي الانعكاس (S_{11}) والإرسال (S_{21}) بالديسيبل (dB) بعد محاكاة المرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع الموضح في الشكل 2.1. ونلاحظ أن SRR لديه إرسال بقيمة تقارب -28 (dB) عند التواتر 41.5(GHz)، بينما يمثل الشكل 3.3 الممانعة المرئية من المنبع (z) بدلالة التواتر للمرنان

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة

بطريقتي استرداد مختلفتين



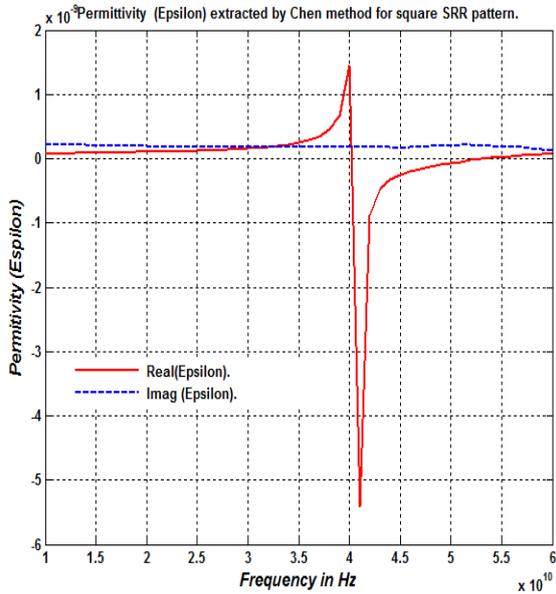
(a)



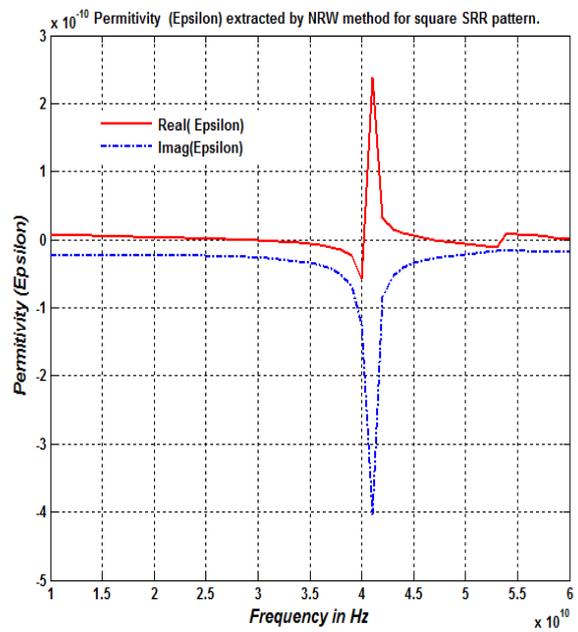
(b)

شكل 3.4 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي النفاذية الفعالة μ_{eff} للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع

(a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW



(a)



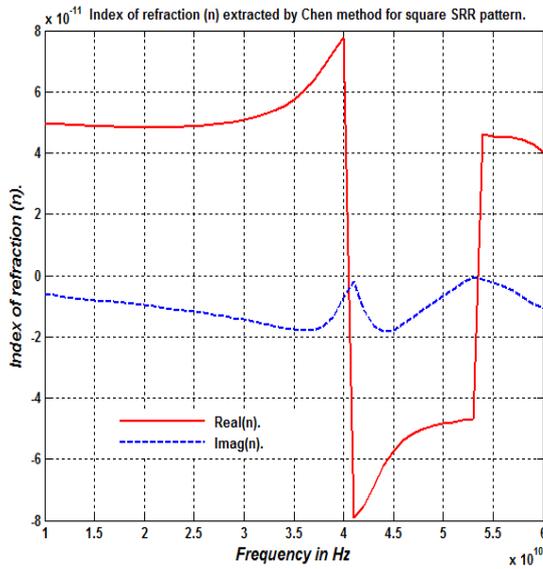
(b)

شكل 5.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي السماحية الفعالة ϵ_{eff} للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع. (a)

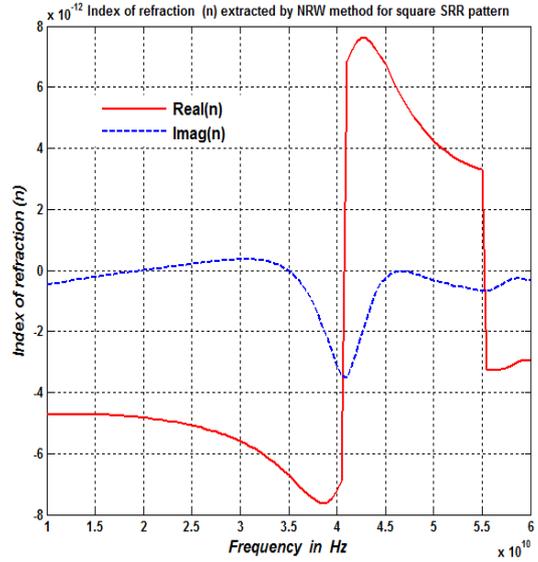
الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW

يوضح الشكل 4.3 و شكل 5.3 على التوالي تغيرات الجزء الحقيقي والتخيلي لكل من النفاذية الفعالة و السماحية الفعالة للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع ، المحسوبة بطريقة NRW بدءاً من المصفوفات S المستخرجة بالمحاكاة بواسطة الطريقة التكرارية (WCIP) ونلاحظ أن الهيكل المحاكي يملك نفاذية و سماحية ذاتا جزء حقيقي سالب في جوار تواتر الرنين $f_{res} = 41.5 \text{ GHz}$.



(a)



(b)

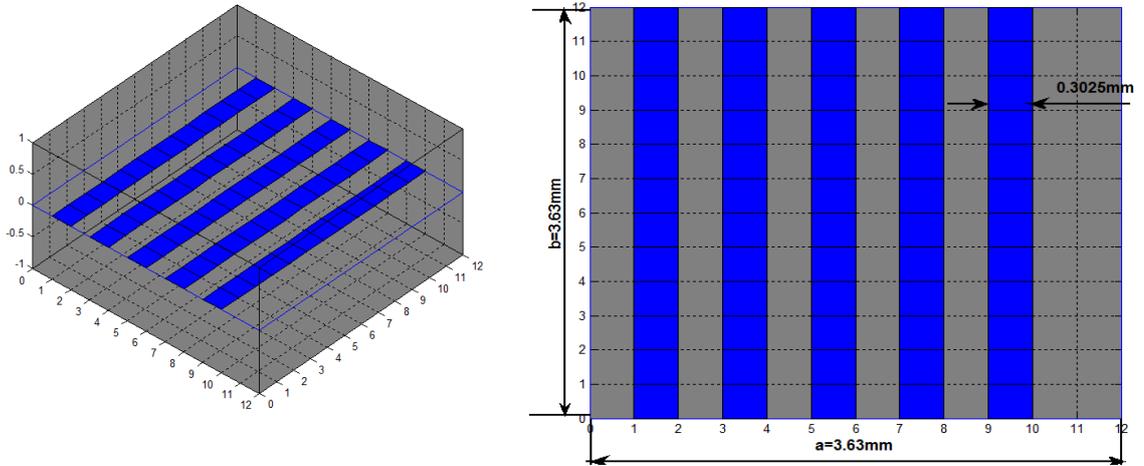
شكل 6.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي لقرينة الانكسار n للمرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع. (a) باستعمال طريقة Chen (b) باستعمال طريقة NRW

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

يوضح شكل 3.6 تغيرات قرينة الانكسار n للمرنان نو الحلقة بشق SRR المربع ، ونلاحظ أن الهيكل المحاكي يملك صفة مادة خارقة (LHM) في نطاق واسع من الترددات و تظهر بقوة في جوار تواتر الرنين من اجل كلا الطريقتين

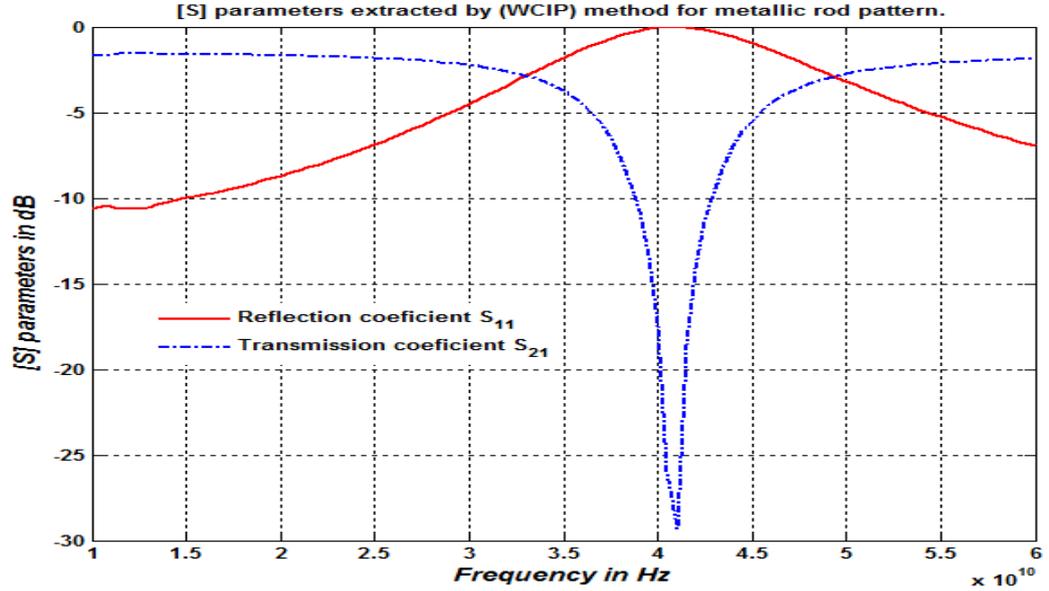
3.2.2 شبكة السيقان المعدنية

في هذا الجزء ، سنهتم بدراسة ومحاكاة شبكة السيقان المعدنية ، ويتم تخصيصه للاشتغال في النطاق [38GHz-43GHz]. تتكون شبكة السيقان المعدنية من النحاس المترسب على ركيزة عازلة من نوع ROGERS RO4003C ، ويتميز بالسماحية 3.38. يكون إطار شبكة السيقان المدروسة على الجانب الخارجي يساوي 3.63mm ، وعرض المسار لكل ساق 0.3025mm ، وتباعدها بفارق 0.3025mm .

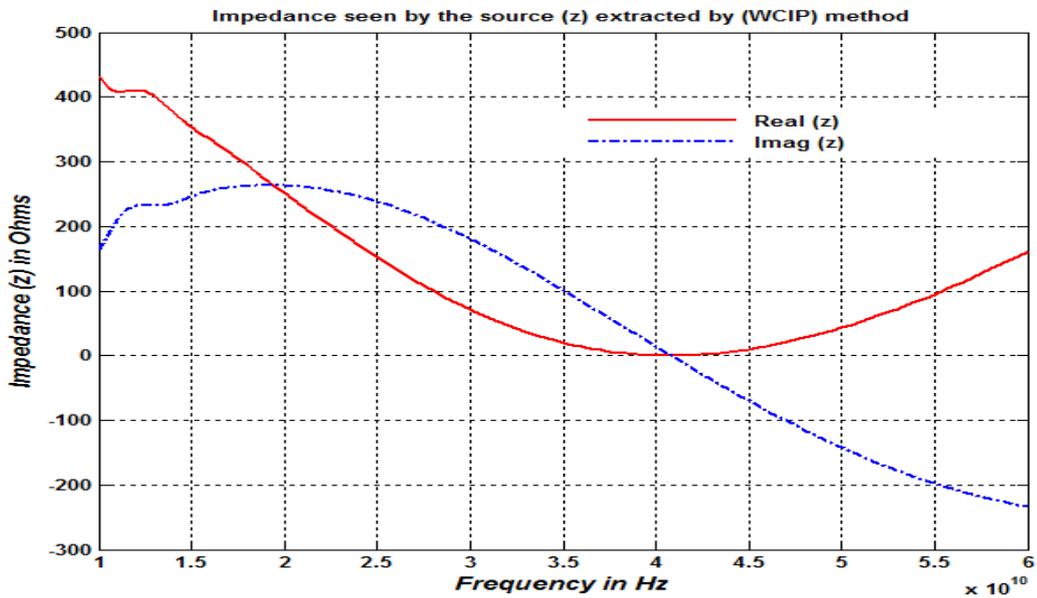


شكل 7.3 تمثيل و أبعاد لشبكة السيقان المعدنية

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين



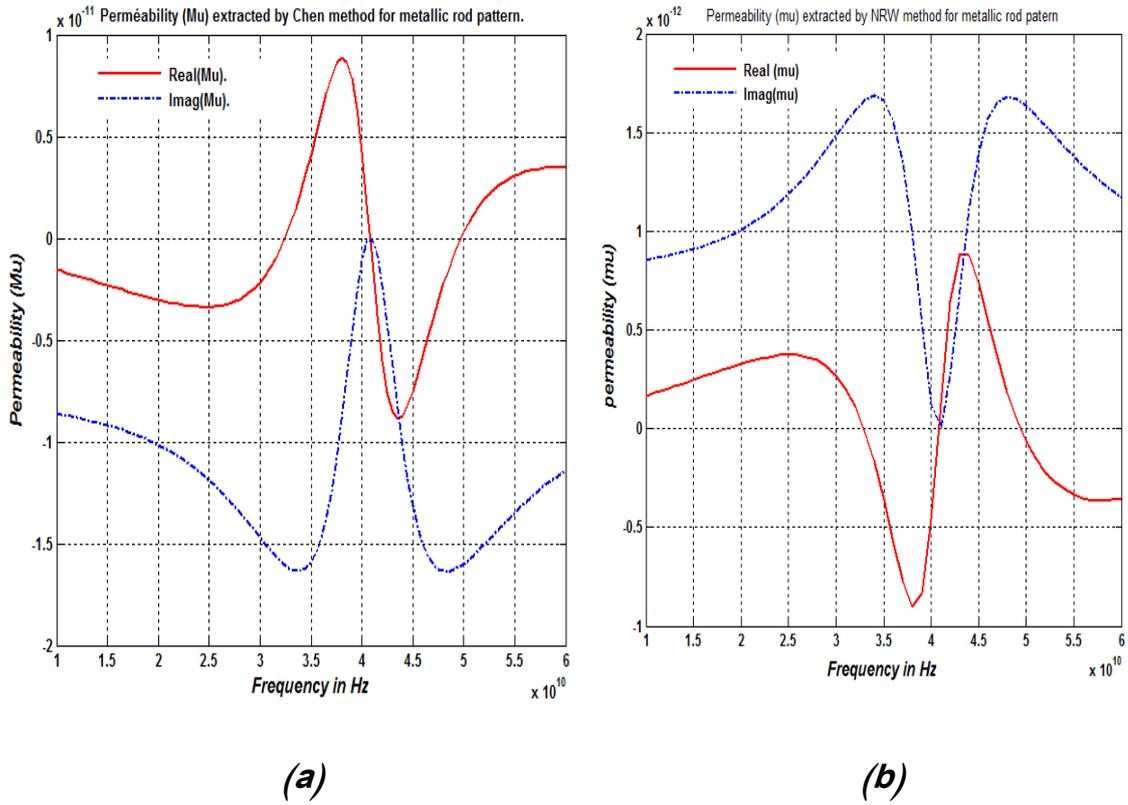
شكل 8.3 تغيرات سعات وسائط الإرسال و الإنعكاس S_{11} و S_{21} بدلالة التواتر لشبكة السيقان المعدنية.



شكل 9.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي الممانعة المرئية من المنبع (z) بدلالة التواتر لشبكة السيقان المعدنية

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

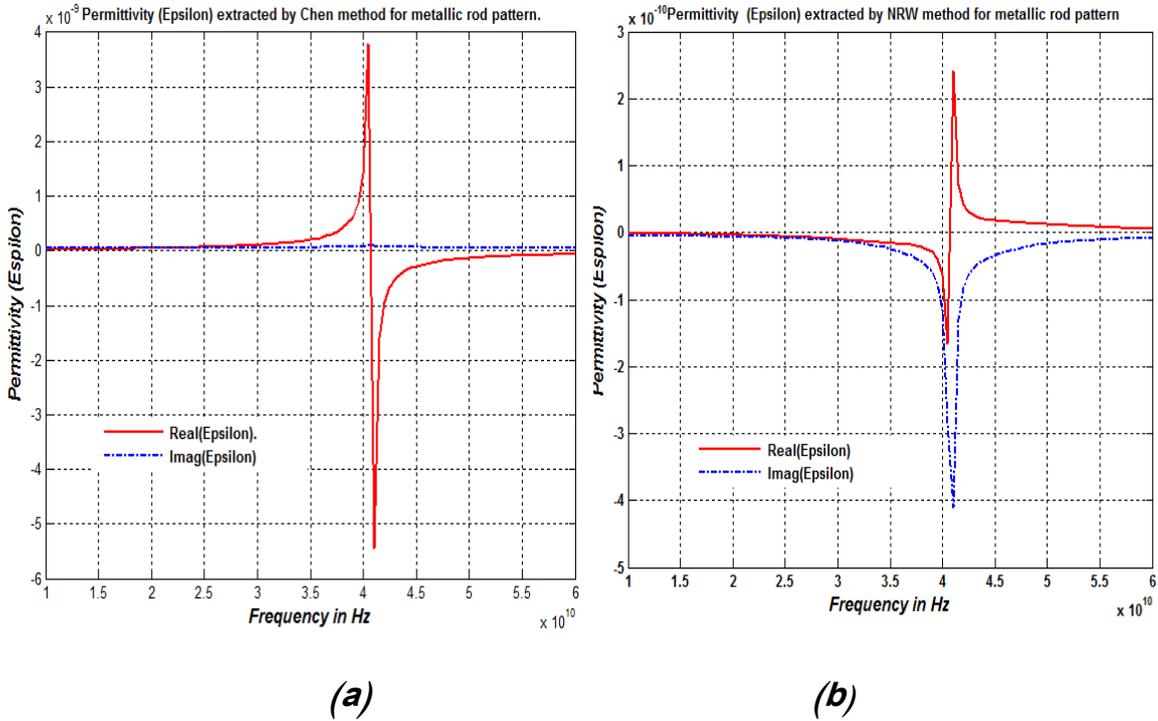
يمثل الشكل 3.8 معاملي الانعكاس (S11) والإرسال (S21) بالديسيبل (dB) بعد محاكاة لشبكة السيقان المعدنية الموضح في شكل 7.3. ونلاحظ أن شبكة السيقان المعدنية لديها إرسال بقيمة تقارب -28(dB) عند التواتر 41.5(GHz) وهو يمثل بالتمام إرسال المرنان ذو الحلقة بشق SRR المربع السابق، بينما يمثل شكل 9.3 الممانعة المرئية من المنبع (Z) بدلالة التواتر لشبكة السيقان المعدنية



شكل 10.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي النفاذية الفعالة μ_{eff} لشبكة السيقان المعدنية

(a) باستخدام طريقة Chen (b) باستخدام طريقة NRW

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين



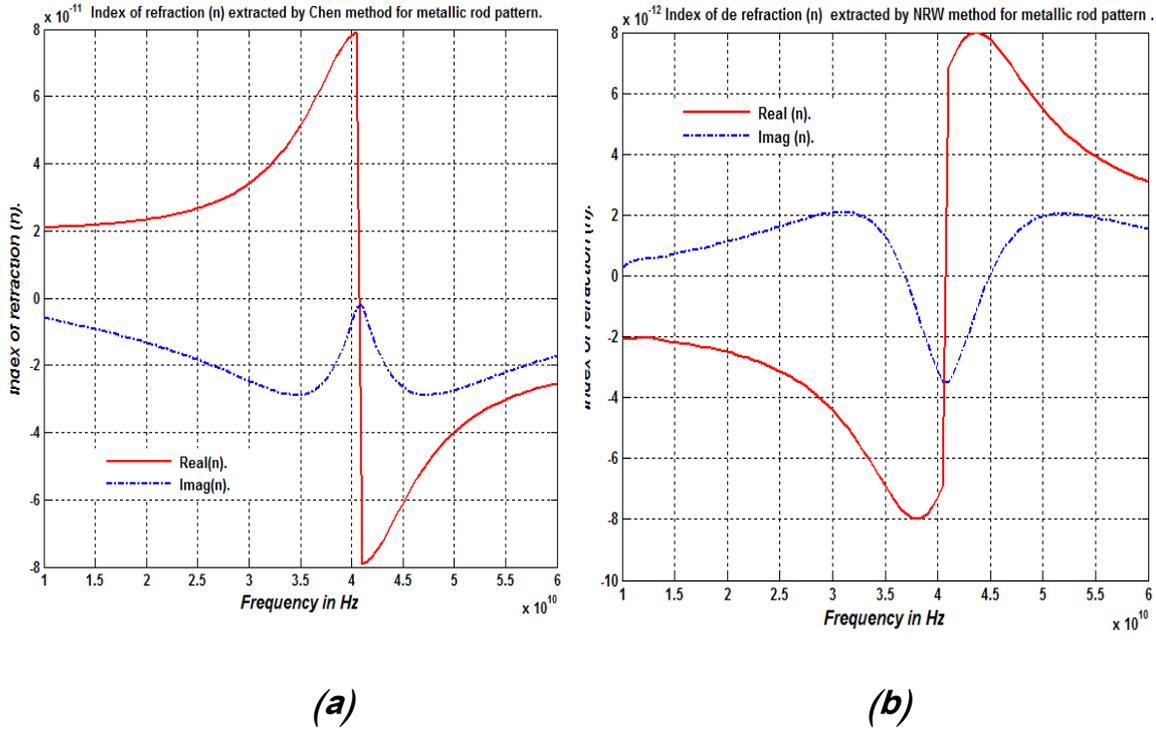
شكل 11.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي للسماحية الفعالة ϵ_{eff} لشبكة السيقان المعدنية

(a) باستخدام طريقة Chen (b) باستخدام طريقة NRW

يوضح الشكل 10.3 و شكل 11.3 على التوالي تغيرات الجزء الحقيقي والتخيلي لكل من النفاذية الفعالة و السماحية الفعالة لشبكة السيقان المعدنية ، ونلاحظ أن الهيكل المحاكي يملك نفاذية و سماحية ذواتا جزء حقيقي سالب في جوار تواتر الرنين $f_{res} = 41.5 GHz$ و ذلك في الجوار فوق تواتر الرنين بالنسبة لطريقة Chen و في الجوار تحت تواتر الرنين بالنسبة لطريقة NRW

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة

بطريقتي استرداد مختلفتين



شكل 12.3 تغيرات الجزء الحقيقي والجزء التخيلي لقرينة الانكسار n لشبكة السيقان المعدنية.

(a) باستخدام طريقة Chen (b) باستخدام طريقة NRW

يوضح الشكل 12.3 و شكل 6.3 على التوالي تغيرات قرينة الانكسار لشبكة السيقان المعدنية ، ونلاحظ أن الهيكل المحاكى يملك صفة مادة خارقة (LHM) في نطاق واسع من الترددات و تظهر بقوة في جوار تواتر الرنين من اجل كلا الطريقتين

3.3 . خاتمة الفصل الثالث

في هذا الفصل قمنا بتطبيق الطريقة التكرارية (WCIP) لمحاكاة ونمذجة بنيتين مستويين غير نشيطتين لنمطين معروفين لمادة خارقة الأول يمثل المرنان ذو الحلقة بشق (SRR) و الثاني يمثل شبكة سيقان معدنية . عدلنا الطريقة التكرارية ببرمجة إضافية لطريقتي استرداد مختلفتين: طريقة (NRW) وطريقة (Chen) اللتين استعملتا في حساب و استخراج الخواص الأساسية

الفصل الثالث: نتائج محاكاة نمطي مادة خارقة واستخراج خصائصها الكهرومغناطيسية باستخدام الطريقة التكرارية مقرونة بطريقتي استرداد مختلفتين

المطلوبة من : سماحية ϵ ، نفاذية μ ، قرينة انكسار n وذلك انطلاقا من وسائط الانعكاس و الإرسال. قمنا برسم منحنيات بدلالة التواتر لكل الخواص التأسيسية باستعمال طريقتي الاسترداد و لكل من نمطي المادة الخارقة المدروسين.

خاتمة عامة

لقد حاولنا في عملنا أن نسلط الضوء على الاهتمام باستخدام محاكيات الموجات الدقيقة لنمذجة، تصميم و تخصيص الدوائر غير النشيطة (في حالتنا قمنا بعملية تخصيص لنمطين معروفين لمادة خارقة). هذه المحاكيات القائمة على البرمجيات و التي تستخدم طرق التوصيف الكهرومغناطيسي ، أصبحت ضرورية خلال مراحل التصنيع لتحسين الخصائص المتوقعة للدارات قبل وضعها في بيئتها النهائية.

سمحت لنا الطريقة التكرارية بما يلي:

- ✓ نمذجة بنية مستوية غير نشيطة محاكية لنمطين معروفين لمادة خارقة الأول يمثل المرنان ذو الحلقة بشق (SRR) و الثاني يمثل شبكة سيقان معدنية .
- ✓ تخصيص نمطين لمادة خارقة باستعمال طريقتي استرداد مختلفتين: طريقة (NRW) وطريقة (Chen) اللتين استعملنا في حساب و استخراج الخواص التأسيسية المطلوبة من : سماحية ϵ ، نفاذية μ ، قرينة إنكسار n ...
- ✓ الاقتراب من مفهوم (التصميم بمساعدة الكمبيوتر) (CAO) لأننا قمنا بدراسة مقارنة لطريقتي تخصيص مختلفتين، فقط من خلال محاكاة دون الحاجة إلى معالجة دارات مادية حقيقية.

- [1] C. A. Gonano, R. E. Zich, and M. Mussetta, "Definition for Polarization P and Magnetization m Fully Consistent with Maxwell's Equations," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 64, 83-101, 2015. doi:10.2528/PIERB15100606.
- [2] Deruelle, N., & Uzan, J.-P. (2018). The Maxwell equations. Oxford Scholarship Online. doi:10.1093/oso/9780198786399.003.0030
- [3] R. P. Feynman, M. Sands, and R. B. Leighton, *The Feynman Lectures on Physics* (Pearson-Addison Wesley, San Francisco, Boston, New York, 2006), Vol. 2, Chap. 10.3.
- [4] R. Badoual. *Les micro-ondes*, volume I & II. Masson, Paris, 1983.
- [5] Veselago, V.G., 1968. THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), pp.509–514. <http://dx.doi.org/10.1070/pu1968v010n04abeh003699>
- [6] Veselago, V. G. (2002). Electrodynamics of Media with Simultaneously Negative Electric Permittivity and Magnetic Permeability. *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*, 83–97. doi:10.1007/978-94-007-1067-2_5
- [7] Veselago, V. G. (2003). Electrodynamics of materials with negative index of refraction. *Physics-Uspekhi*, 46(7), 764–768. doi:10.1070/pu2003v046n07abeh001614
- [8] Chettiar, U. K., Kildishev, A. V., Yuan, H.-K., Cai, W., Xiao, S., Drachev, V. P., & Shalaev, V. M. (2007). Double Negative Index Metamaterial: Simultaneous Negative Permeability and Permittivity at 812 nm. *Photonic Metamaterials: From Random to Periodic*. doi:10.1364/meta.2007.ma3
- [9] J. B. Pendry, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11) :2075–2084, 1999.
- [10] Labidi, M. (2012). *Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat présentée à l'Ecole Supérieure des Communications de Tunis Année Universitaire)
- [11] Kafesaki, M. (2011). Optical negative-index response of nanoscale metamaterials. *SPIE Newsroom*. doi:10.1117/2.1201012.003355
- [12] Z. Jiangfeng, K. Thomas, and C. M. Soukoulis. "Magnetic and electric excitations in split ring resonators". *Optics Express*, Vol. 15, No. 26, pp. 17881-17890, 2007.
- [13] O'Brien, S. and Pendry, J.B., 2002. Magnetic activity at infrared frequencies in structured metallic photonic crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(25), p.6383.
- [14] Pendry, John B. (2004). "Negative Refraction". *Contemporary Physics* (Princeton University Press) 45 (3): 191–202.
- [15] Brun, M.; S. Guenneau, and A.B. Movchan (2009-02-09). "Achieving control of in-plane elastic waves". *Appl. Phys. Lett.* 94 (061903): 1–7.
- [16] Baudrand, H. and R. S. N'Gongo, "Application of wave concept iterative procedure in planar circuits," Special Issue on Recent Research Developments in Microwave Theory and Techniques, Vol. 1, 187–197, Trans world Research Network, January 1999.
- [17] Méjri Fathi « Modélisation électromagnétique des structure active planaires par une méthode itérative avec une source auxiliaire localisée ». Thèse de doctorat ENIT. soutenue le 4 février 2006.
- [18] H. Baudrand. "Representation by Equivalent circuit of the Integral methods in microwave passive elements" laboratoire de Micro Ondes ENSEEIHT. pp 1359-1364. 1990
- [19] Ziar, T., Zaabat, M., & Baudrand, H. (2012). The study of packaging miniaturization effect on the characteristics of an active planar circuit by using the iterative method. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 26(6), 521–532. doi:10.1002/jnm.1858
- [20] Mellal, S., Ziar, T., Farh, H., Hati, K., Zemmal, B., Touaibia, I., ... Baudrand, H. (2019). Obtaining Directly Quasi-Square Open Ring FSS Constitutive Effective Parameters by Using Coupled WCIP - Retrieval Method. *Defect and Diffusion Forum*, 397, 187–199.

- doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.397.187
- [21] Patel, N. (n.d.). Theory, Simulation, Fabrication and Testing of Double Negative and Epsilon Near Zero Metamaterials for Microwave Applications. doi:10.15368/theses.2008.22
- [22] Nicolson, A.M. & Ross, G.F., 1970. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 19(4), pp.377–382. <http://dx.doi.org/10.1109/tim.1970.4313932>
- [23] Chen, X. et al., 2004. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. Physical Review E, 70(1). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.70.016608>
- [24] Alexandre Jean René Serres “ Application de la méthode itérative base sur le concept des ondes (WCIP) pour l’analyse des antenne et des circuits planaires multicouches”. thèse de doctorat université fédérale de Campina grande Paraíba Brésil 2011(en portugais)
- [25] Ziar, Toufik. "Modélisation et caractérisation des circuits passifs intégrés." thèse de doctorat université Labi Ben M'hidi d'Oum el bouaghi, Algérie(2013)