

# Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) Cavities

Eng. Assal Alkhoder\*

Dr. Fariz Abboud\*\*

---

## abstract

In this paper, we discuss one way to integrate waveguide cavities with strip lines technologies to obtain a new structure of substrate integrated waveguide cavity which can be an integrated part with other microwave circuits, and it is fabricated by the same technology, where microwave circuits are fabricated using printed circuit board PCB technology, and it characterized by specifications of each the tow technologies, traditional waveguide and planar circuits, concerning the quality factor and the small volume. We propose a new method to reduce the volumes of these substrate integrated waveguide cavities to obtain what is called Half Mode Substrate integrated Waveguide HMSIW cavities, where these cavities maintain half of electric and magnetic fields distributions of the Substrate Integrated Waveguide SIW cavity at the same resonant frequency. This cavity has half area of the traditional SIW cavity area, where also it can be fabricated by printed circuit board technology. Results of this paper show that we can use this new kind of SIW cavities in microwave circuits especially microwave filters which are so important in this domain.

---

Keywords: Substrate Integrated waveguide SIW, Half Mode Substrate Integrated Waveguide HMSIW

For the paper in arabic see page ().

\* Master student- Department of Electronics and Communication – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - University of Damascus

\*\* Department of Electronics and Communication – Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - University of Damascus

---

## فجوات أدلة الموجة الشرائحية ذات نصف النمط HMSIW

م. أسل الخضر\*

د. فريز عبود\*\*

### المخلص

نناقش في ورقة البحث هذه إحدى طرق دمج فجوات أدلة الموجة مع تقنيات النواقل الشرائحية لنحصل على بنية فجوة دليل موجة شرائحية SIW يمكن أن تكون جزء مدمج بدارات الأمواج الميكروية الأخرى ويتم تصنيعها بنفس التقنية، حيث يتم تصنيع دارات الأمواج الميكروية باستخدام تقنية بطاقات الدارات المطبوعة PCB، كما أنها تمتاز بشيء من مزايا كل من تقنيتي أدلة الموجة التقليدية والنواقل الشرائحية كعامل الجودة الجيد وصغر الحجم. نقترح طريقة جديدة لتصغير حجوم هذه الفجوات الشرائحية لنحصل على ما يسمى بفجوات أدلة الموجة ذات نصف النمط HMSIW، حيث تحتفظ هذه الفجوة بنصف توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي للفجوة SIW عند نفس تردد الرنين. تتميز هذه الفجوات بأن لها نصف مساحة الفجوة SIW التقليدية، حيث يمكن تصنيعها أيضاً بتقنية بطاقات الدارات المطبوعة. تبين نتائج هذه الورقة أنه يمكن اعتماد هذا النوع الجديد من الفجوات الشرائحية في دارات الأمواج الميكروية ولا سيما مرشحات الأمواج الميكروية ذات الأهمية البالغة في هذا المجال.

---

الكلمات المفتاحية: أدلة الموجة الشرائحية SIW، فجوات أدلة الموجة ذات نصف النمط HMSIW

\* أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندس أسل الخضر بإشراف الدكتور فريز عبود – قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

\*\* قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

**1- مقدمة**

لقد تم بناء العناصر التي تعمل ضمن مجال الأمواج الميكروبية والميليمترية تقليدياً باستخدام تقنية أدلة الموجة والتي تكون فيها المفاقيد منخفضة وعامل الجودة عالي. وعادة ما نتجنب استخدام التقنيات المسطحة عند الحاجة إلى عوامل جودة عالية ومفاقيد منخفضة بسبب انخفاض عامل جودتها وارتفاع مفاقيدها الناتج عن وجود مادة الشريحة العازلة. وبالرغم من ذلك ومع تطور تقنية micromachining من الممكن تصنيع رنانات بخطوط microstrip أو CPW (Coplanar Waveguide) معلقة على غشاء membrane [1]، وفجوات رنانة بأنماط منتشرة أو متلاشية [2,3]، ورنانات عازلة [4]. وهذا يمكننا من الحصول على عناصر ذات عامل جودة عالي ومفاقيد منخفضة، والتي يمكن دمجها monolithically مع عناصر أخرى فعالة وغير فعالة على شريحة واحدة. إن أدلة الموجة والرنانات التي تعتمد عليها شيء أساسي في هندسة الأمواج الميكروبية وتشكل إحدى أهم المجموعات في دارات الأمواج الميكروبية ولا سيما في تصميم المرشحات.

وحيث أن المتطلبات الأساسية في نظم الاتصالات والرادارات الحديثة هي فقد التحويل (insertion loss) المنخفض والحجوم المنخفضة ورفض عالي في مجال المنع مع الحفاظ على تكاليف منخفضة. تؤمن لنا تقنية SIW (Substrate Integrated Waveguide) خياراً جيداً في تصميم هذه المرشحات. فهي ذات حجوم وأوزان صغيرة بينما تحافظ على أداء عالي [5]. وبالرغم من ذلك فإن عامل الجودة غير المحمل لفجوات SIW ينخفض مع ازدياد التردد. سنهتم في ورقة البحث هذه بالمبادئ الأساسية

لدليل الموجة الشرائحي SIW. وسنجري مراجعة حول أدلة الموجة الشرائحية SIW بتشكيلة مختلفة تقودنا إلى فجوات نصف النمط. وسنذكر أهم ميزات بعض البنى وحيدة الطبقة. ومن ثم سننتقل إلى شكل جديد من الفجوات الرنانة المشكلة بتقنية SIW.

**2- أدلة الموجة الشرائحية SIW التقليدية**

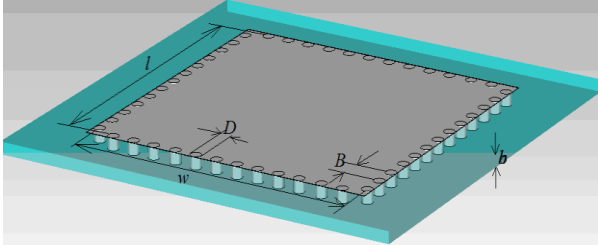
تُعرف تقنية التصميم التي يتم فيها دمج دليل موجة مستطيل بالدارات المسطحة على نفس الشريحة العازلة باستخدام تقنية الدارات المدمجة بالنواقل الشرائحية MIC (Microstrip-Integrated-Circuit) بتقنية أدلة الموجة الشرائحية SIW (Substrate Integrated Waveguide). يسمح هذا التقريب بالتغلب على معظم الصعوبات التي نواجهها مع أدلة الموجة المستطيلة التقليدية، كصعوبة التصنيع والدمج مع دارات الأمواج الميكروبية الأخرى. تحتفظ بنية SIW بمميزات دليل الموجة المستطيل التقليدي ذو العرض الذي يساوي العرض المكافئ للـSIW، ما يسمح باستخدام نفس تقنيات التحليل والتصميم لهذه البنى.

يبين الشكل (1) دليل موجة شرائحي SIW. إن المبدأ العام لهذا النوع من أدلة الموجة هو ما يسمى بأدلة الموجة ذات الجدران الجانبية التي تتشكل من أعمدة post-wall [6]. فإذا حفرنا في شريحة عازلة صفيين من الثقوب وطينا جدرانها الداخلية بالمعدن فإننا سنحصل على دليل موجة ذو جدران جانبية على شكل أعمدة معدنية، هذا الدليل مملوء بعازل له ثابت عازلية الشريحة العازلة، حيث أن وجهي الشريحة العازلة وبين صفي الثقوب على الأقل سيكونان مطلين بالمعدن. تشير الدراسات المرجعية [6] إلى أن الموجة التي تنتشر ضمن الدليل SIW لن تتسرب من بين الثقوب المطلية بالمعدن عندما تكون

وسهولة الدمج بين الدارات التي يمكن أن تنفذ على نفس البطاقة بينما تتميز الفجوات الرنانة التقليدية بعامل الجودة العالي.

### 3-1 فجوات SIW الرنانة التقليدية

يتم تنفيذ فجوة رنانة بتقنية SIW بحصر جزء من المادة العازلة للبطاقة العازلة المطلية من وجهيها بالمعدن بواسطة أربعة صفوف من الثقوب المطلية من الداخل بالمعدن، كما يبين الشكل (2)، فإن الموجة لن تتسرب من بين الثقوب المطلية بالمعدن، وعندها فإن صفوف الثقوب ستمثل جداراً كهربائياً مكافئاً ( $E = 0$ )، وسنحصل على فجوة دليل موجة شرائحية SIW، [7,8].



شكل (2) فجوة SIW رنانة

ينطبق على فجوات SIW الرنانة ما ينطبق على فجوات أدلة الموجة التقليدية المملوءة بعازل ولكن بعد استبدال الأبعاد الأفقية لها بأبعاد مكافئة (من أجل حساب تردد الرنين مثلاً). فيعطى تردد الرنين للنمط  $TE_{m0n}$  مثلاً بالعلاقة [8]:

$$f_{m0n} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{l_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n}{w_{eff}}\right)^2} \quad (4)$$

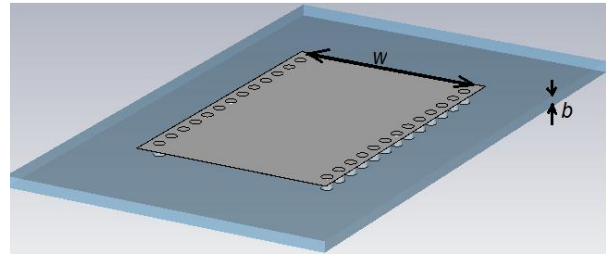
حيث نعتبر هنا أن ارتفاع الشريحة العازلة أي ارتفاع الدليل SIW والمقابل للبعد  $b$  في دليل الموجة التقليدي

المسافة الفاصلة بين الثقوب المتجاورة صغيرة بالنسبة لطول الموجة المنتشرة ضمن الدليل SIW. وكي تنتشر الموجة الميكروية ضمن الدليل SIW دون حدوث تسريب يجب أن يتحقق الشرطين التاليين: [6,7]

$$B < \frac{\lambda_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{2} \quad (1)$$

$$B < 4D \quad (2)$$

حيث  $D$  هي قطر الثقوب المشكلة للجدران،  $B$  المسافة بين تقبين متجاورين.



شكل (1) دليل موجة شرائحي SIW

وبالتالي فإن الدليل الشرائحي SIW يكافئ دليل موجة مستطيل تقليدي، ويمكن تحليله وتصميمه بالنسبة للنمط الأساسي كدليل موجة مستطيل وذلك باستبدال البعد العريض لدليل الموجة المستطيل وهو  $a$  بالعرض الفعلي للدليل الشرائحي SIW، وبحيث تكون المسافات الفاصلة بين الثقوب الممعدنة المتجاورة صغيرة بما يكفي. ويمكننا أن نشق العرض الفعلي للدليل الشرائحي SIW بالتقريب التالي: [7]

$$w_{eff} = w - \frac{D^2}{0.95B} \quad (3)$$

### 3- فجوات SIW

تتميز الدارات المصنعة بتقنية الدارات المطبوعة PCB كما ذكرنا سابقاً بسهولة التصنيع

$$E_y = \frac{-2A^+ k_{mln} Z_0 a}{\pi} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d} \quad (7)$$

$$H_x = \frac{2jA^+ a}{d} \sin \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi z}{d} \quad (8)$$

$$H_z = -2jA^+ \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d} \quad (9)$$

حيث أن  $k_{mln}$  هو رقم موجة النمط  $mln$ ، والذي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$k_{mln} = \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{l\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2}$$

ويجب أن نضيف أيضاً أن التقريبات التي ذكرناها في العلاقات الأخيرة السابقة صحيحة من أجل الشرطين (1) و (2). [11,12]

### 3-2 فجوات SIW الرنانة المطوية

إن الغاية من هذا النوع من الفجوات الرنانة قياساً بالرنانات SIW التقليدية هو الحصول على مساحات أصغر للدارات المشكلة من هذا النوع من الفجوات الرنانة. وبالتالي يمكننا أن نحصل باستخدام الفجوات الرنانة الشرائحية المطوية على دارات أمواج ميكروية لها حجوم أصغر من التي تستخدم الفجوات الشرائحية SIW [13,17,18]. يمكننا أن نطبق نفس طريقة طي فجوات أدلة الموجة التقليدية [14,15] من أجل تشكيل فجوات مطوية بتقنية SIW لنحصل على ما يسمى فجوات أدلة الموجة المطوية الشرائحية FSIW أو (Folded Substrate Integrated Waveguide) أو (Substrate Integrated Folded Waveguide)

صغيراً جداً (البعدين  $a$  و  $d$  في دليل الموجة المستطيل التقليدي يكافئان البعدين  $w_{eff}$  و  $l_{eff}$  في الدليل الشرائحي SIW)، ومن هنا فإن الدليل  $mln$  في تردد الرنين للنمط  $TE_{m0n}$  سيصبح  $m0n$  أي أن  $l$  يساوي الصفر حيث أن ارتفاع الدليل SIW أصغر من نصف طول الموجة ( $l$ ) تمثل عدد أنصاف طول الموجة في ارتفاع الدليل). أما  $w_{eff}$  و  $l_{eff}$  فهما الطول والعرض الفعليين للفجوة SIW، واللذين يحسبان من العلاقات التالية: [7.8]

$$w_{eff} = w - \frac{D^2}{0.95B} \quad (5)$$

$$l_{eff} = l - \frac{D^2}{0.95B} \quad (6)$$

$D$  هو قطر الثقوب المعدنية و  $B$  هي المسافة بين اثنين متجاورين منها ( $l$  هنا هي الطول الفيزيائي للفجوة الشرائحية وليست هي البعد الثاني من الدليل  $mln$ ).  $c_0$  هي سرعة انتشار الضوء في الخلاء و  $\mu_r$  و  $\epsilon_r$  هما ثابت النفاذية المغناطيسية وثابت عازلية البطاقة العازلة التي نبنى عليها الـ SIW [9]. نهتم هنا بالنمط  $TE_{m0n}$  لأن الأبعاد الأفقية لفجوة SIW كبيرة قياساً بارتفاعها، ومن هنا في معظم الحالات فإن ارتفاع الشريحة سيكون صغيراً بالنسبة لنصف طول الموجة عند تردد الرنين، وبالتالي نأخذ حالة  $l$  تساوي الصفر بينما كل من  $m$  و  $n$  لا تساوي الصفر.

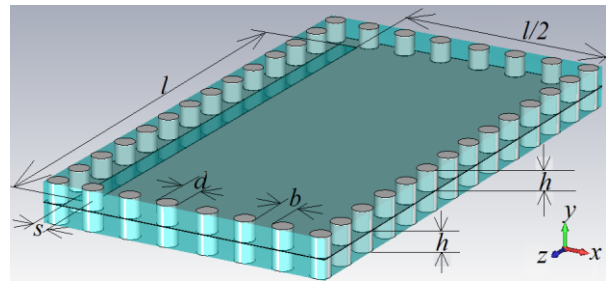
كما يمكننا أن نستخدم علاقات حساب الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في الفجوة المستطيلة التقليدية على فجوات SIW الرنانة، فيمكننا أن نستخدم العلاقات التالية، بعد استبدال  $a$  بـ  $w_{eff}$  و  $b$  بـ  $h$  و  $d$  بـ  $l_{eff}$ :

[10]

رئيتها مقارنة بفجوة SIW الرنانة بالرغم من تسميتها رنانة نصف النمط المطوية، ولذلك من المفيد أن نرى توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في هذا النوع من الفجوات الرنانة للمقارنة مع رنانة نصف النمط الجديدة التي توصلنا إليها وسنقوم بعرضها في الفقرة التالية، وهي فجوة رنانة جديدة تحتفظ فقط بنصف نمط الرنين عند نفس تردد رنينها. إن غايتنا هنا هي أن نرى توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في فجوة SIW وفجوة HMSIFW لهما نفس تردد الرنين باستخدام برنامج المحاكاة CST Microwave Studio. نستخدم من أجل المحاكاة فجوة أبعادها  $0.8 \times 20 \times 20$  مم وكل من قطر الثقوب المشكلة للجدران الجانبية والمسافات بينها يساوي  $0.8$  mm، حيث المادة التي تملأ الفجوة لها ثابت عزلية نسبي يساوي  $4.5$  وثابت نفاذية مغناطيسية نسبي يساوي  $1$ . إن الأبعاد المذكورة لنصف قطر الثقوب والمسافات الفاصلة بينها تحقق الشرطين (1) و (2)، نجد بمحاكاة هذه الفجوة بواسطة أداة الحل eigen mode solver والتي تعمل ضمن برنامج CST Microwave Studio أن تردد الرنين من أجل هذه الأبعاد يساوي تقريباً  $5.09$  GHz. يبين الشكل (4) توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في فجوة SIW عند تردد رنينها  $5.09$  GHz. مع الإشارة إلى أننا نظهر الحقل الكهربائي في المستوي  $xy$  والحقل المغناطيسي في المستوي  $xz$ . حيث يشير شكل توزع الحقول إلى أن نمط الرنين هو النمط  $TE_{101}$ .

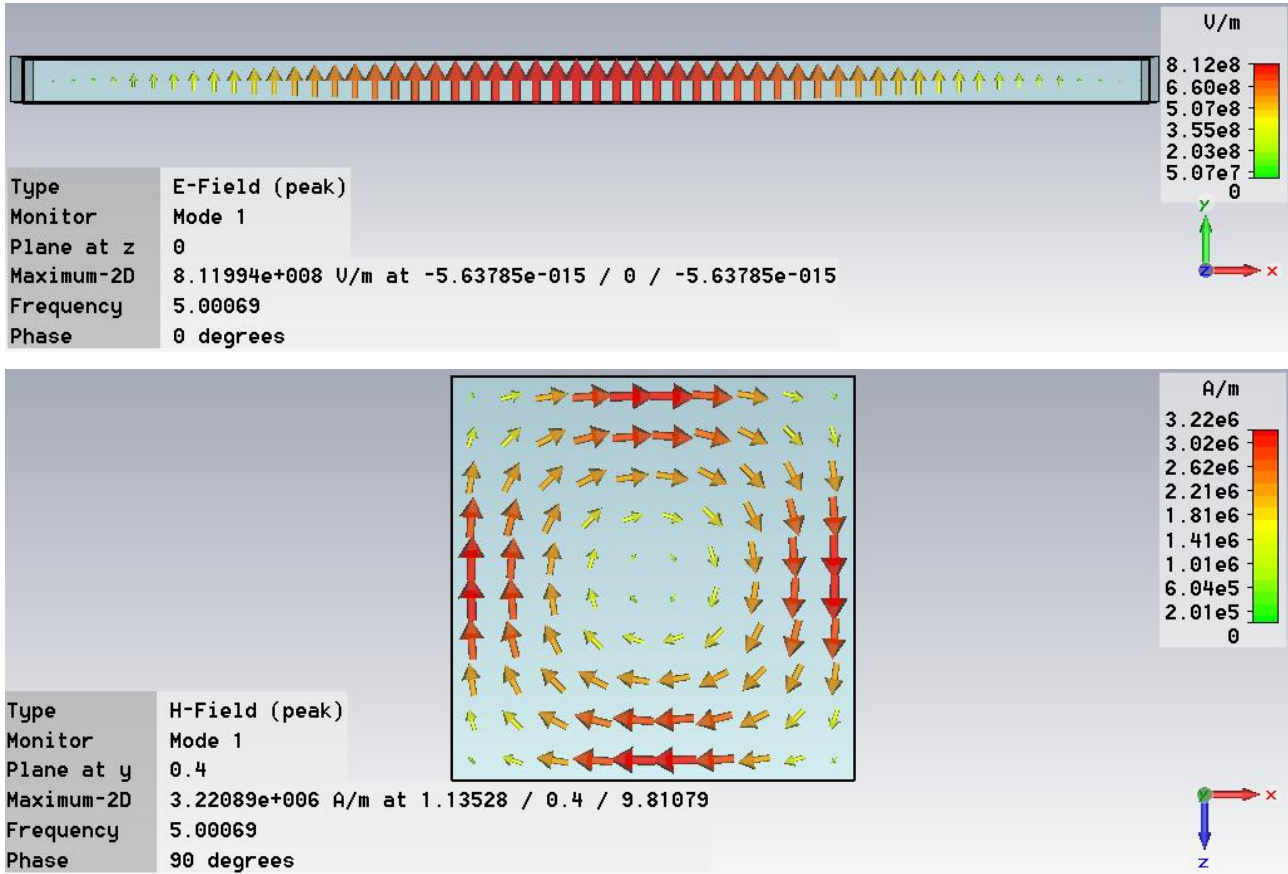
بإجراء محاكاة للفجوة المبينة في الشكل (3)، حيث أن  $h = 0.8$  mm ،  $l = 20$  mm ،  $d = b = 0.8$  mm. نجد أن تردد الرنين يساوي تقريباً  $5.09$  GHz، وهو قريب من تردد الرنين للفجوة SIW، كما يبين الشكل (5) توزع الحقلين الكهربائي

(Waveguide) [13]. من أجل تنفيذ الرنانات المطوية نحتاج إلى طبقتين من الشرائح العازلة يفصل بينهما طبقة معدنية (طباعة معدنية بتقنية بطاقات الدارات المطبوعة PCB)، جزء من كل من هاتين الشريحتين العازلتين محصور بأربعة صفوف من الثقوب المطوية بالمعدن من الداخل بينما يجب أن يبقى شق في الطبقة المعدنية الفاصلة بين طبقتي العازل على شكل | على أحد حوافها بين صفوف الثقوب لنحصل على رنانة SIW مطوية تسمى برنانة بنصف طول الموجة الشرائحية المطوية أو رنانة نصف النمط الشرائحية المطوية HMSIFW كما هو مبين في الشكل (3). حيث يُظهر الشكل (3) أن الفجوة أصبحت متوضعة بطبقتين عازلتين يفصل بينهما طبقة معدنية فيها شق بشكل |. من الواضح أننا نختصر الحجم مع هذا النوع من الفجوات إلى نصف حجم الفجوة SIW التقليدية، وبالرغم من أن تصنيعها أصعب ولكن أصبح الآن ممكن مع تطور تقنيات PCB و LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic). [16,17,8,19]



شكل 3 فجوة HMSIFW رنانة بنصف طول الموجة

كما يمكن استخدام نفس مبدأ الطي لنجري الطي مرة أخرى ونحصل على ما يسمى برنانات ربع طول الموجة الشرائحية أو رنانات ربع النمط الشرائحية [13]. تحتفظ الفجوة الرنانة HMSIFW بكامل نمط الرنين (توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي) عند تردد



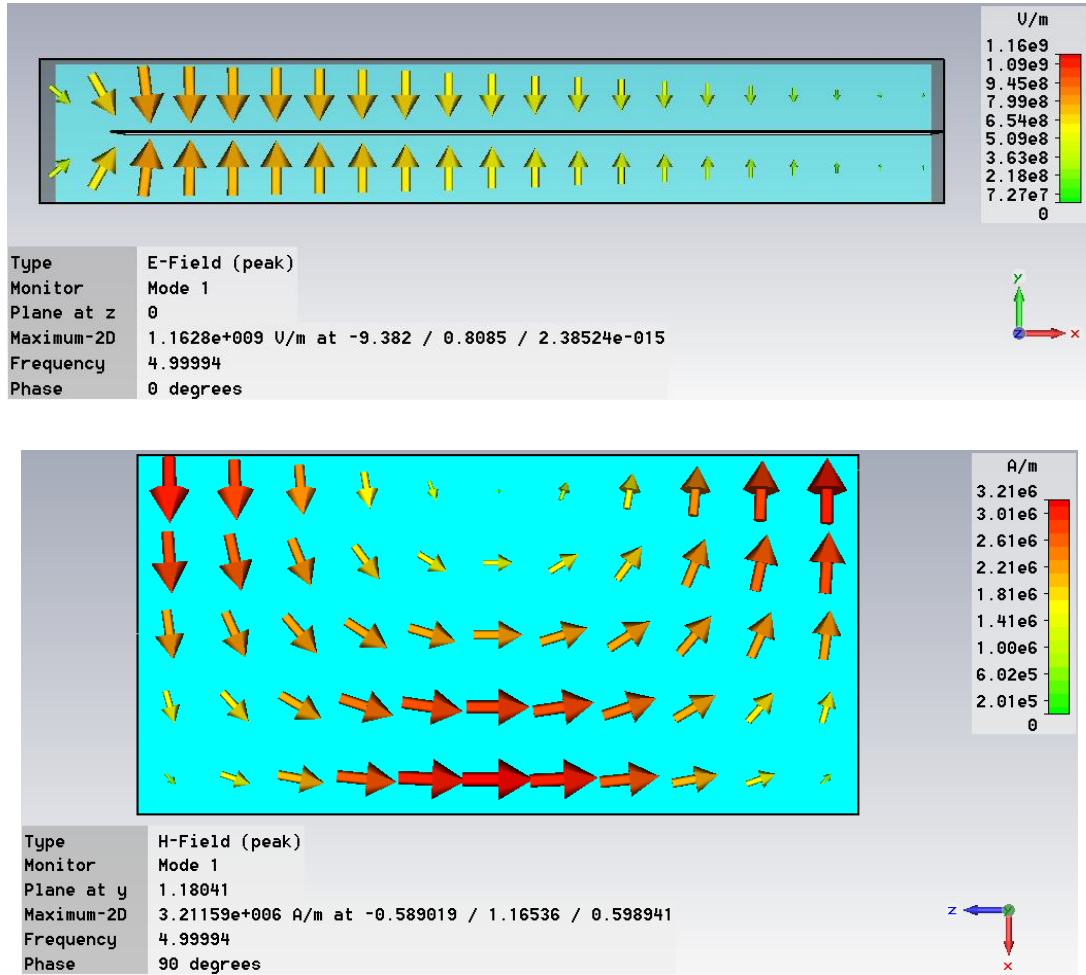
شكل (4) توزيع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في فجوة SIW رنانة

الحقل الكهربائي (والمغناطيسي)، إلا أن هذا التوزيع يكرر نفسه في كل من الطبقتين العليا والسفلى من الفجوة HMSIFW.

ومن أجل إعادة تردد رنين الفجوة HMSIFW إلى 5 GHz نجد باستخدام برنامج المحاكاة نفسه أن  $l$  يجب أن تصبح 20.36 mm. بالتالي فإن حجمي الفجوتين SIW و HMSIFW متقاربين. إلا أنه عندما نتحدث عن دارات الأمواج الميكروية التي تستخدم الشرائح العازلة فإننا نسعى إلى تصغير المساحات التي تشغلها عناصر الأمواج الميكروية وليس حجمها، إذ أن سماكة الشريحة العازلة يُعتبر صغير مقارنةً بسطح أو مساحة العنصر. وعلى ذلك يمكننا أن نرى أن أننا

والمغناطيسي ضمن هذه الفجوة (HMSIFW). مع الإشارة إلى أننا ومن أجل الفائدة نبين الحقل الكهربائي في المستوي  $xy$  والحقل المغناطيسي في المستوي  $xz$ ، وذلك للمقارنة مع توزيعي الحقلين الكهربائي والمغناطيسي لفجوة SIW والمبينين في الشكل (4).

يمكننا أن نرى من الشكلين (4) و (5) أن توزيعي الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في الفجوة HMSIFW هما نفس التوزيع في الفجوة SIW وذلك بالنسبة لجدران الفجوة، أي وكأننا نقوم بطي توزيعي الحقلين الكهربائي والمغناطيسي مع طي الفجوة. بينما تأتي تسمية نصف النمط من ناحية أننا إذا نظرنا إلى شكل توزيع الحقل من الأعلى فإننا سنرى فقط نصف توزيع

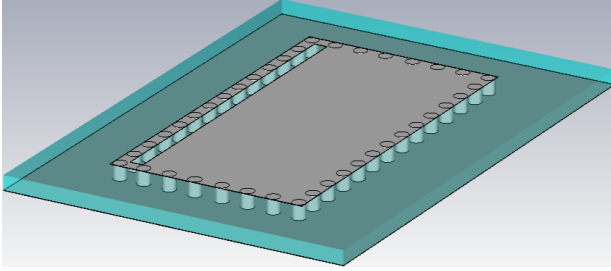


شكل (5) توزيع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في فجوة HMSIFW رنانة

أيامنا هذه تصنيع البطاقات متعددة الطبقات، إلا أن ذلك عند ترددات منخفضة، إذ أن المواد المستخدمة في لصق طبقتين من الشرائح العازلة ستجعل وسط الانتشار غير متجانس، ويزداد هذا اللاتجانس مع زيادة التردد ما يؤثر على أداء العناصر التي تعتمد هذه الفجوات. ومن هنا يوجد مساعي حديثة لتصغير مساحات الفجوات SIW بطرق أخرى. منها مثلاً زيادة ثابت عازلية الشرائح المستخدمة، ما يؤدي إلى نقصان طول الموجة ضمن المادة العازلة وبالتالي تصغير مساحات هذه الفجوات.

اختصرنا هنا سطح الفجوة الرنانة إلى النصف تقريباً بانتقالنا من الفجوة SIW إلى فجوة HMSIW، وهذا سينعكس على العناصر التي تستخدم هذه الأنواع من الفجوات (كمرشحات الأمواج الميكروية مثلاً)، حتى ولو كان ليس بنفس المقدار. إلا أن تصنيع فجوات HMSIFW تتطلب تقنية بطاقات الدارات المطبوعة PCB (Printed Circuit Board) متعددة الطبقات، وهذا يضيف صعوبة أو نقطة سلبية على فجوات HMSIFW مقابل فجوات SIW التي تحتاج تقنية PCB طبقة واحدة فقط. حتى ولو كان من السهل جداً في





شكل (6) فجوة HMSIW رنانة بتقنية PCB

يأخذ طلاء الطبقة العليا الشكل المبين في الشكل (6)، وتكون الشريحة التي تشكل الطبقة العليا من الطلاء محاطة على الأقل بثلاثة صفوف من الثقوب المطلية بالمعدن من الداخل من أجل فجوات HMSIW، بينما يجب أن يبقى شق في الطبقة المعدنية العليا على شكل | على أحد حوافها بين صفوف الثقوب لنحصل على فجوة HMSIW كما هو مبين في الشكل (6)، حيث تمت إحاطة فجوة HMSIW بأربعة صفوف من الثقوب المطلية بالمعدن من الداخل مع المحافظة على شكل الشق المذكور.

بإجراء محاكاة للفجوة المبينة في الشكل (6) مع المحافظة على الأبعاد  $l = 20 \text{ mm}$  وارتفاع الشريحة العازلة  $0.8 \text{ mm}$  سنجد أن تردد الرنين قد ازداد إلى  $5.148 \text{ GHz}$  تقريباً. بينما يبين الشكل (7) توزيع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي ضمن هذه الفجوة. إن هذه الفجوة مفتوحة من الأعلى عن طريق الشق المذكور سابقاً، وبالتالي فإن الأمواج المنتشرة ضمن الفجوة ستنتشر خارجها أيضاً، ولذلك تمت المحاكاة للفجوة مع منطقة هوائية ارتفاعها  $5 \text{ mm}$  فوق الفجوة كما يبين الشكل (7). يمكننا أن نرى من الشكل (7) أن الموجة تنتشر خارج الفجوة في المنطقة الهوائية، حتى ولو كانت كثافة الحقول خارج الفجوة HMSIW صغيرة مقارنة بها داخل الفجوة. وهذا يضيف نقطة سلبية إلى الفجوة

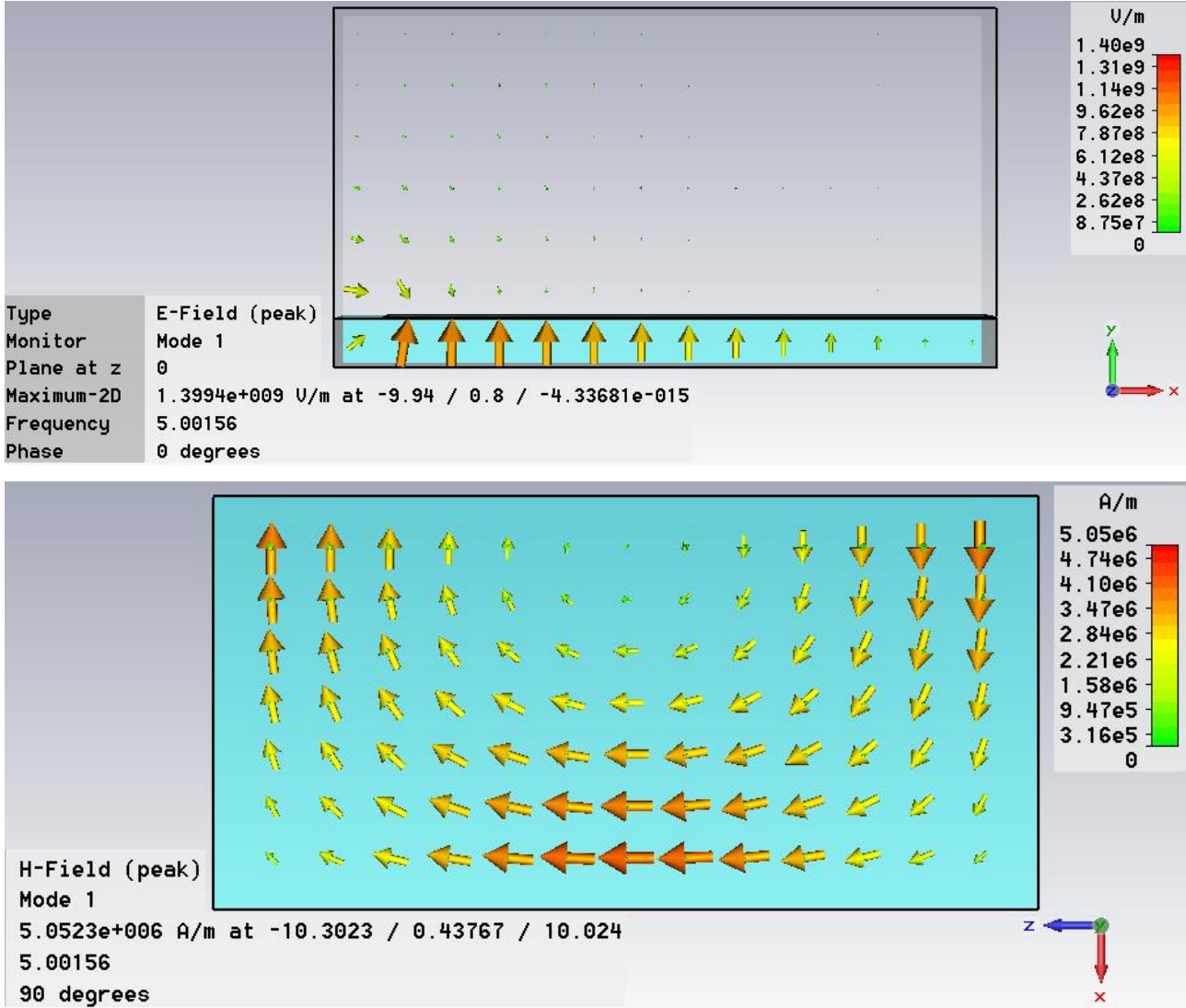
سنرى فيما يلي طريقة أخرى لتصغير حجوم الفجوات SIW الرنانة وذلك باستخدام فجوات تحتفظ بنصف نمط الرنين فقط وليس بكامل نمط الرنين وذلك عند نفس تردد الرنين، كما أنه يمكن استخدام تقنية PCB البسيطة وحيدة الطبقة. وبالتالي كما سنرى سنحصل على فجوة لها نفس مساحة أو سطح قريب من مساحة الفجوة HMSIFW ولها نفس تردد الرنين.

### 3-3 الفجوات الشرائحية ذات نصف النمط

نقترح في هذه الفقرة رنانة دليل موجة شرائحية بنصف النمط. إن المقصود بعبارة رنانة نصف النمط هو أن الرنانة ستحتفظ بنصف نمط الرنين مقارنةً بفجوة SIW تقليدية عند نفس تردد الرنين وبالتالي فإن حجم الفجوة الرنانة الجديدة سيساوي نصف حجم الرنانة الأساسية دون اللجوء إلى طي الرنانة. نحصل على هذه الرنانة من اقتطاع نصف الرنانة SIW الأساسية دون أن نلجأ إلى الطي كما هو مبين الشكل (6).

إن الغاية من هذا النوع من الفجوات الرنانة قياساً بالرنانات SIW التقليدية والمطوية هو الحصول على مساحات أصغر للدارات المشكلة من هذا النوع من الفجوات الرنانة بالإضافة إلى أنها تمتاز عن الفجوات الرنانة المطوية بأنه يمكن تنفيذها على طبقة واحدة بتقنية الدارات المطبوعة PCB. ولكي نفهم كيفية الحصول على هذا النوع من الفجوات الشرائحية يمكننا أن نتخيل أننا نقتطع نصف الفجوة SIW.

إذا وباستخدام تقنية PCB يمكننا أن نحصل على ما نسميه فجوات أدلة الموجة الشرائحية ذات نصف النمط (فجوات HMSIW) كما هو مبين في الشكل (6). ونحتاج من أجل تنفيذ هذا النوع من الرنانات إلى طبقة واحدة فقط من الشريحة العازلة مطلية من الأسفل بينما



شكل (7) توزيع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في فجوة HMSIW

الفجوة، وبالتالي لا بد من زيادة أبعادها الأفقية لإعادة تردد الرنين إلى التردد 5GHz، وباستخدام برنامج المحاكاة نجد أن تردد الرنين يصبح 5GHz من أجل  $l = 20.65 \text{ mm}$  أي بالمحصلة نختصر مساحة الفجوة بنسبة 0.562 تقريباً عند الانتقال من الفجوة SIW إلى الفجوة HMSIW. أما بالنسبة لعلمة التحجيب فيكفي أن يكون ارتفاعها كبير بالنسبة لارتفاع الشريحة العازلة مقسوماً بالجزء التريبيعي لثابت عازلية الشريحة نفسها كي تكون كثافة الحقول ضمن المنطقة الهوائية في الفجوة

الجديدة HMSIW. إذ أن هذا الانتشار خارج الفجوة سيؤدي إلى تداخل مع دارات الأمواج الميكروية التي يمكن أن تتواجد مع الفجوة على نفس الشريحة العازلة، أو أن الفجوة ستتأثر بوجود تلك الدارات. وبالمحصلة فإن هذا الشق المتروك على الوجه العلوي للفجوة سيلعب دور هوائي ولو بأداء ضعيف. ولذلك ومن أجل التخلص من هذه الظاهرة لا بد من تحجيب الفجوة بعلمة معدنية تحصر الحقول ضمن فضاء محدود.

الملاحظة الأخرى هنا هي زيادة تردد رنين هذه

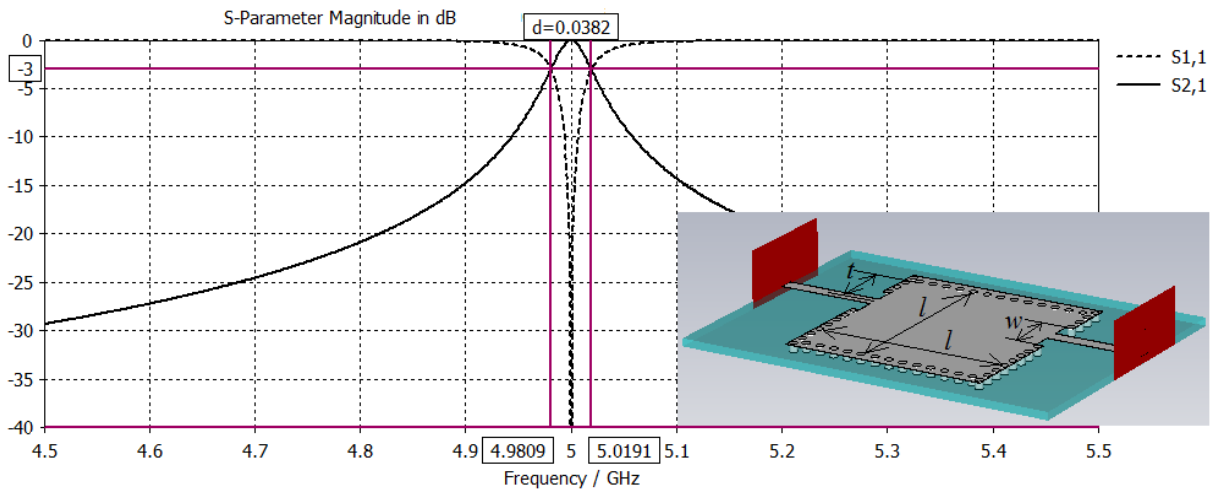
جودتها قبل وبعد التحميل. ولذلك سنجري محاكاة للفجوات المذكورة من أجل إيجاد عامل الجودة الكلي ودراسة أثر قطع فجوة SIW للحصول على هذه الفجوة المصغرة HMSIW على عامل الجودة. نشير إلى أن هناك عدة طرق لوصول الفجوة SIW مع عدة أنواع من خطوط النقل الشرائحية مثل خط النقل الشرائحي coplanar microstrip أو دليل الموجة المستوي stripline ثلاثي الطبقات أو الخط الشرائحي waveguide [11,12,19,20]. يبين الشكل (8) فجوة SIW الكاملة الرنانة مع طريقة وصلها بخط نقل شرائحي microstrip مع استجابة هذه الفجوة. وهي البنية التي نعتدها في المحاكاة.

نشير هنا إلى أن البعد  $t$  المبين في الشكل (8) وهو المسافة بين مركز خط النقل الشرائحي microstrip وزاوية الفجوة يساوي  $1/2-3$  mm وهو بعد اعتباطي يؤثر على عامل جودة الفجوة وفقاً لما وجدنا عن طريق المحاكاة، إلا أننا سنختار نفس القيمة في الفجوة HMSIW من أجل المقارنة. كما أن البعد  $w$  وهو عرض فتحة الربط بين الفجوة HMSIW وخط

صغير مقارنة بالكثافة ضمن الشريحة العازلة. ويبقى هنا أن نشير إلى أن وجود علبة التحجيب يشكل نقطة سلبية إلا أن تصنيع هذه العلب المعدنية يبقى أسهل بكثير من تصنيع البطاقات متعددة الطبقات مع المحافظة على تجانس وسط الانتشار.

#### 4- أثر تصغير فجوات SIW الرنانة

سنرى في هذه الفقرة الفرق بين فجوة SIW الكاملة والفجوة HMSIW من حيث عامل الجودة لهذه الفجوات. اخترنا هنا تردد رنين الفجوة 5GHz وهو نفس تردد الرنين الذي اخترناه سابقاً. مع الإشارة هنا إلى أننا لم نأخذ مفايد العازل بعين الاعتبار في المحاكاة إذ ما يهمنا هنا هو إيجاد أثر اقتطاع جزء من الفجوة على عامل الجودة وأبعاد الفجوات المدروسة. من المفيد أن ندرس عامل الجودة للفجوة الرنانة بعد وصلها مع الوسط المحيط من أجل المحاكاة. ويشارك نوعين من عامل الجودة للفجوة الرنانة بعد وصلها مع الوسط المحيط، عامل جودتها قبل التحميل وعامل جودتها مع التحميل، فمقلوب عامل جودتها الكلي يساوي مجموع مقلوبي عاملي



شكل (8) استجابة فجوة SIW الرنانة

جزئي عامل الجودة لها قبل وبعد التحميل. تجدر الإشارة هنا إلى أن عامل الجودة لهذه الفجوة يتعلق بعرض فتحة الترابط (المنشئة في صفوف الثقوب الممعدنة) بين الفجوة وخط النقل الشرائحي الميكروي بالإضافة إلى موقع هذه الفتحة أو بعد نقطة وصل خط النقل الشرائحي microstrip عن إحدى حافتي الجهة التي تتغذى منها الفجوة الرنانة. فكلما نقص عرض هذه الفتحة ازداد عامل الجودة. ولقد اخترنا هنا قيم اعتبارية لعرض الفتحة وموقعها ولكنها نفس القيم التي سنختارها في الفجوة HMSIW التي سنراها فيما يلي.

#### عامل جودة فجوة HMSIW

عند قطع فجوة SIW الرنانة كي نحصل على فجوة HMSIW فإننا نحصل باستخدام نفس الأبعاد  $l = 20.65 \text{ mm}$  مع المحافظة على  $h = 0.8 \text{ mm}$  على تردد رنين أقل من 5GHz، ما يدل على القيمة الفعلية للبعد  $l$  أكبر من قيمتها الفيزيائية، وبالتالي أعدنا ضبط البعد  $l$  كي نحصل على تردد رنين 5GHz، وتصبح  $l = 19.68 \text{ mm}$ . بين الشكل (9) هذه الفجوة مع استجاباتها الترددية. ويظهر من الشكل أن عامل جودة هذه

النقل الشرائحي وهو يؤثر أيضاً على عامل جودة الفجوة الكلي أيضاً وفقاً للمحاكاة، ونختاره هنا أيضاً كقيمة اعتبارية تساوي 5 mm ولكن نختار أيضاً نفس القيمة من أجل الفجوة HMSIW أيضاً للمقارنة.

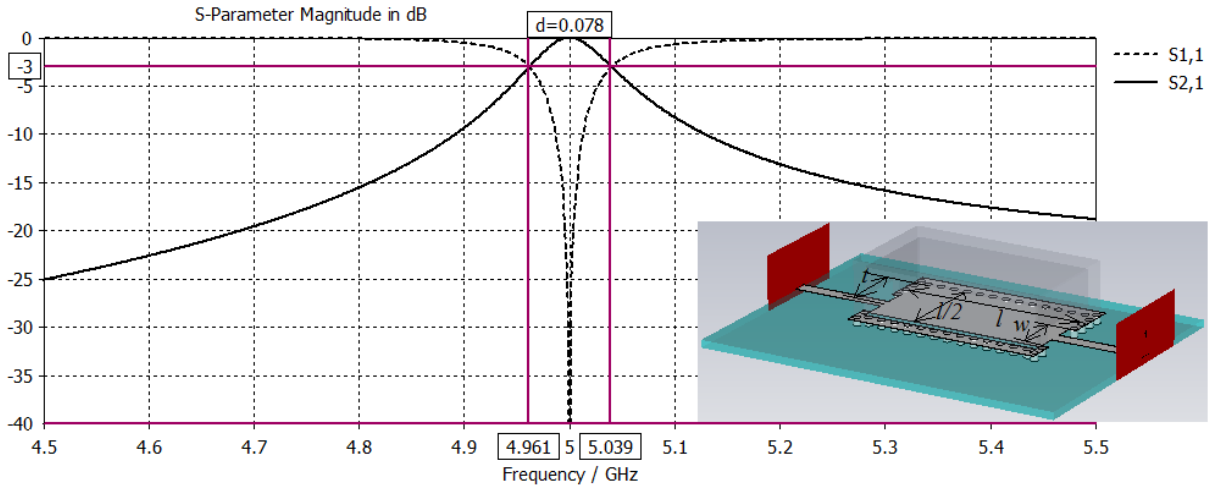
عند إجراء محاكاة للفجوة بنفس الأبعاد المذكورة سابقة فإن تردد الرنين سيتغير بسبب وجود خط النقل الشرائحي ووجود الفتحة بينه وبين الفجوة، ولذلك أعدنا ضبط الأبعاد الأفقية للفجوة لنحصل على نفس تردد الرنين 5 GHz وكان طول وعرض الفجوة  $l = 19.365 \text{ mm}$ .

يُحسب عامل الجودة الكلي من الاستجابة

الترددية للفجوة من العلاقة التالية: [8]

$$Q = \frac{f_0}{BW_{-3dB}} \quad (10)$$

حيث  $f_0$  هو تردد رنين الفجوة و  $BW_{-3dB}$  هو عرض مجال التمرير عند -3dB، ومنه نجد أن عامل جودة فجوة SIW الرنانة الكاملة يساوي تقريباً 130.7. إن عامل الجودة هذا هو عامل الجودة الكلي الذي يتضمن



شكل (9) استجابة فجوة SIWHM الرنانة

## 5- خلاصة

اقترحنا طريقة جديدة لتصغير المساحات باقتطاع جزء من الفجوة الرنانة الشرائحية SIW (نصفها) لنحصل على فجوة نصف نمط شرائحية (فجوة HMSIW) رنانة. تحتفظ هذه الفجوة كما وجدنا تقريباً بنصف توزع الحقلين الكهربائي والمغناطيسي مقارنةً بفجوة SIW الرنانة التي اقتطعنا منها هذه الفجوة وذلك عند نفس تردد الرنين. ووجدنا أن عامل الجودة ينخفض مع الفجوات الجديدة، وأنه يمكننا تحجيب الفجوة المذكورة لعزلها عن الدارات المحيطة ويمكننا أيضاً مع التحجيب أن نزيد عامل الجودة.

الفجوة يساوي وفقاً للعلاقة (10) 64.1 تقريباً ما يشير إلى انخفاض كبير في عامل جودة هذه الفجوة قياساً بفجوة SIW الكاملة.

نشير هنا إلى أنه تمت محاكاة الفجوة HMSIW مع وجود علة تحجيب ارتفاعها يساوي 5 mm. بإجراء المحاكاة عدة مرات مع تغيير ارتفاع علة التحجيب نلاحظ تحسن بسيط في عامل الجودة بعد التحجيب. ينتج هذا التحسن البسيط كون الاستطاعة المحصورة ضمن الفجوة المحجبة ستصبح بكثافة أعلى مع نقصان الحجم الداخلي لعلة التحجيب، أي أن الطاقة المخزنة في الفجوة والمنطقة الهوائية تبقى نفسها ولكن تزداد كثافتها بوحدة الحجم، ولهذا السبب ازداد معامل الجودة، وهي نتيجة طبيعية يمكننا أن نحصل عليها من بعض المراجع العلمية مثل [8,10]. كما وجدنا من المحاكاة أن ارتفاع فجوة التحجيب يؤثر على تردد الرنين قليلاً، فمثلاً عندما يتغير ارتفاع علة التحجيب بين 4.5mm و 5.5mm فإن تردد الرنين سيتغير بين 5.02GHz و 4.98GHz تقريباً مع إبقاء باقي الأبعاد ثابتة، بينما يبقى تأثيره صغير جداً على عامل الجودة. في حين أن تغير  $s$  عرض الشق في الطبقة العليا من الفجوة من 0.1mm حتى 0.8mm يؤدي إلى تغيير التردد من 5.02GHz إلى 5GHz تقريباً بينما يتحسن عامل الجودة من 64.1 من أجل  $s = 0.8$  إلى 72.3 تقريباً من أجل  $s = 0.1$ ، وذلك مع بقاء ارتفاع فجوة التحجيب 5mm. ما يُظهر التحسين الذي يمكن أن نجريه على فجوات HMSIW بتغيير بعد صف الثقوب المطلية بالمعدن عن طرف الفجوة المفتوح بالإضافة إلى المساعدة في تحجيب الفجوة وعزلها عن الدارات المحيطة (إن وُجِدَت).

المراجع العلمية

- [11] Stavros Georgakopoulos, Stanislav Ogurtsov ,An S-parameter Extraction Technique for Broad-Band Characterization of Microstrip-to-SIW Transitions, IEEE,2009
- [12] Chyi-kwei Yau, Ting-Yi Huang, Tze-Min Shen, Hung-Yi Chien, Ruey-Beei Wu , Design of 30GHz Transition between Microstrip Line and Substrate Integrated Waveguide, IEEE & Asia-Pacific Microwave Conference 2007,
- [13] Nikolaos Grigoropoulos, Benito Sanz-Izquierdo, and Paul R. Young, "Substrate Integrated Folded Waveguides (SIFW) and Filters," IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, vol. 15, pp. 829-831, 2005.
- [14] J. S. Hong, "Compact folded-waveguide resonators," Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol. 1, 2004.
- [15] J. S. Hong, "Compact folded-waveguide resonators and filters," Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings-, vol. 153, pp. 325-329, 2006.
- [16] Runqi Zhang, Zhigang Wang, Bo Yan, Ruimin Xu, FSIW cavity filter and Derivative FSIW cavity and its filters with LTCC technology, IEEE, 2009
- [17] Hung-Yi Chien, Tze-Min Shen, Ting-Yi Huang, Miniaturized Bandpass Filters With Double-Folded Substrate Integrated Waveguide Resonators in LTCC, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 57, NO. 7, JULY 2009
- [18] Zhang-Cheng Hao<sup>1</sup>, Wei Hong<sup>1</sup>, Xiao-Ping Chen<sup>1</sup>, Ji-Xin Chen<sup>1</sup> and Ke Wu, A single-layer folded Substrate Integrated Waveguide (SIW) filter, IEEE, 2005
- [19] Xiao-Ping Chen, Ke Wu ,Low-Loss Ultra-Wideband Transition between Conductor-Backed Coplanar Waveguide and Substrate Integrated Waveguide, IEEE, 2009
- [20] Yan Ding, Ke Wu, Substrate Integrated Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 55, NO. 12, DECEMBER 2007
- [1] P. Blondy, A. R. Brown, D. Cros, and G. M. Rebeiz, "Low-loss micromachined filters for millimeter-wave communicationsystems," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 2283-2288, 1998.
- [2] J. Papapolymerou, J. C. Cheng, J. East, and L. P. B. Katehi, "A micromachined high-Q X-band resonator," Microwave and Guided Wave Letters, IEEE [see also IEEE Microwave and Wireless Components Letters], vol. 7, pp. 168-170, 1997.
- [3] T. A. Schwarz and L. P. B. Katehi, "A Micromachined Evanescent Mode Resonator," European Microwave Conference, 1999. 29th, vol. 2, 1999.
- [4] B. Guillon, D. Cros, P. Pons, K. Grenier, T. Parra, J. L. Cazaux, J. C. Lalaurie, J.Graffeuil, and R. Plana, "Design and realization of high Q millimeter-wave structures throughmicromachining techniques," Microwave Symposium Digest, 1999 IEEE MTT-S International, vol. 4, 1999.
- [5] D. Deslandes and K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 2, pp. 593-596, Feb. 2003.
- [6] Teis Johan Coenen thesis Analysis andDesign of Post-Wall Waveguides for Application in SIW, 2010
- [7] Y. Cassivi, L. Perreggini, P. Arcioni, M. Bressan, K. Wu, and G. Conciauro, "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide," in IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., vol. 12, no. 9, Sep. 2002, pp. 333-335.
- [8] D.M. Pozar, Microwave Engineering, forth ed. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc, 2011.
- [9] D. Deslandes and K. Wu, "Design Consideration and Performance Analysis of Substrate Integrated Waveguide Components," European Microwave Conference, 2002. 32nd, pp. 1-4, 2002.
- [10] Robert E.Collin ,Foundations for microwave Engineering, Mc Graw hill International Editions, Electrical Engineering series.