

تحلیل موجی کامل سوئیچ میکروالکترومکانیکی موازی بر روی موجبر هم صفحه

فرخ حجت کاشانی

استاد گروه مخابرات - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت

جلیل راشد محصل

استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

حبيب ۰۰۱ زلفخانی

گروه مخابرات - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت

(تاریخ دریافت ۸۳/۳/۳۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۲/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۸/۷)

چکیده

در این مقاله تحلیل موجی کامل الکترومغناطیسی سوئیچ میکروالکترومکانیکی در فرکانسهای میکروویو و امواج میلیمتری ارائه می شود. با حل معادله موج هلمهولتز با روش عناصر محدود (FEM) و با استفاده از شبیه ساز HFSS میدانها را بدست می آوریم. ساختار سوئیچ را بعنوان دو قطبی فرض کرده و پارامترهای پراکندگی (S) را از میدانهای بدست آمده استخراج میکنیم. مشخصات و کمیتهای توصیف کننده سوئیچ از جمله تلفات داخلی در حالت روشن در محدوده $1/22-0/02$ dB و ایزولاسیون در حالت خاموش $60-14$ dB در محدوده فرکانسی $1-60$ GHz بدست می آید. همچنین سوئیچ MEMS را بعنوان یک خازن در نظر گرفته و با مدل عناصر فشرده تقریب می زنیم. با استفاده از روابط ماتریس پراکندگی و ماتریس انتقال عملکرد سوئیچ محاسبه و نتایج را با تحلیل کامل مقایسه می کنیم در نهایت پارامترهای S برای ابعاد و فرکانسهای مختلف مشخص می شود. این پارامترها در طراحی کامپیوتری مدارات (CAD) فرکانس بالا اهمیت اساسی دارد.

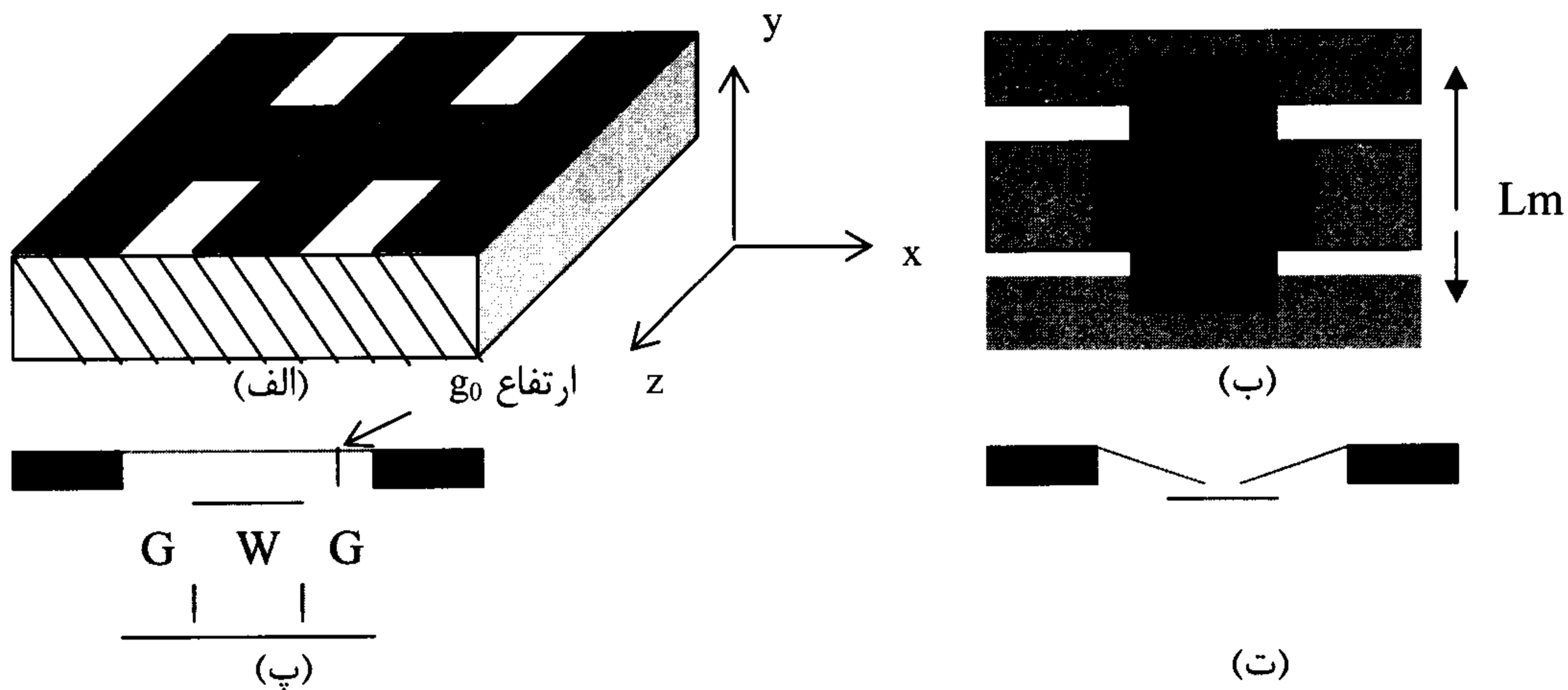
واژه های کلیدی: موجبر هم صفحه، سوئیچ MEMS، الکترومغناطیس عددی، پارامترهای S، تلفات داخلی،

ایزولاسیون

مقدمه

سوئیچ در شکل (۱) دیده می شود که از یک لایه نازک فلزی بصورت معلق بر روی هادی مرکزی همانند پل که در طرفین به هادیهای کناری متصل گردیده تشکیل شده است [۱]. بدون ولتاژ بایاس لایه با فاصله زیاد از هادی مرکزی قرار داشته و سیگنال توسط خط انتقال می یابد. با اعمال ولتاژ بایاس در اثر نیروی الکترواستاتیکی لایه پائین کشیده شده و در واقع سیگنال را اتصال کوتاه می کند. بدین ترتیب حالتی روشن و خاموش سوئیچ ایجاد می گردد. یک لایه دی الکتریک روی هادی مرکزی خط برای جلوگیری از اتصال فلز به فلز قرار داده می شود. پهنا؛ فاصله و جنس هادیهای CPW و ضخامت و جنس زیرلایه و همچنین جنس؛ طول؛ پهنا و ضخامت لایه در عملکرد سوئیچ مؤثرند. همچنانکه از شکل (۱) دیده میشود ساختار این سوئیچ از موادی با جنسهای متفاوت با شرایط مرزی پیچیده تشکیل شده است همین امر استفاده از روش تحلیل موجی کامل را ضروری

کاربرد سیستمهای میکروالکترومکانیکی^۱ (MEMS) در آرایه های فازی آنتنهای میکرواستریپ و بطور عام در مهندسی آنتن و میکروویو افزایش چشمگیری داشته و در سالهای اخیر توجه محققان و مهندسان را به خود معطوف کرده است. خازنهای متغیر و سوئیچ ها و انتقال دهنده های فاز از جمله عناصری هستند که با فناوری MEMS ساخته شده اند. در این میان سوئیچ بعنوان بلوک اصلی اهمیت ویژه ای دارد. تلفات داخلی پائین؛ ایزولاسیون بالا؛ اعوجاج انترمدولاسیون پائین در اثر خاصیت خطی قوی؛ وزن و حجم و هزینه ساخت کم و نیز سازگاری با فناوری MIC^۲ و MMIC^۳ مزایای عمده این سوئیچ ها نسبت به سوئیچهای نیمه هادی FET و دیود های P-I-N می باشد. البته سرعت سوئیچینگ پائین و ولتاژ بایاس بالا از جمله معایب این سوئیچهاست. سوئیچ موازی بر روی موج بر هم صفحه^۴ (CPW) معروفترین و پر کاربردترین سوئیچ MEMS محسوب می شود. ساختمان فیزیکی این نوع



شکل ۱: الف) سوییچ MEMS از دید روبرو (ب) لایه روی CPW از دید بالا (پ) حالت پائین - سوییچ خاموش (ت) حالت بالا - سوییچ روشن

موج هلمهولتز برای این نوع مسائل با استفاده از معادلات ماکسول بصورت زیر است:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times E - k_0^2 \varepsilon_r E = 0 \quad (1)$$

نظریه اینکه بدنبال حل معادله موج درمد انتشار امواج هستیم میدانها را بصورت زیر که بیانگر انتشار موج در جهت z در حالت هارمونیک با زمان می باشد؛ در نظر می گیریم:

$$E(x, y, z, t) = \text{Re}[E(x, y) e^{j(\omega t - \gamma z)}] \quad (2)$$

معادله موج مربوط به E و H با روشهای عددی وبا توجه به شرایط مرزی حل ؛ و رفتار الکترومغناطیسی ساختار معلوم می گردد. حل در ساختار سوییچ MEMS بعلاجه محیط نا همگن و شرایط مرزی غیر منطبق بر صفحات کامل مختصات چندان آسان نیست. از میان شبیه ساز های موجود HFSS بطور مؤثری برای چنین ساختاری مناسب است که در اینجا تحلیل موجی کامل را با آن انجام می دهیم.

HFSS روش عناصر محدود^۶ (FEM) را بکار گرفته و فضای مورد نظر را به چهار وجهی های زیادی تقسیم کرده ومیدانها را در هر سلول تقریب می زند. معادلات موج را برای میدانهای الکتریکی ومغناطیسی بطور مستقل حل کرده ونتایج در معادلات ماکسول زیر آزمایش می شود:

می نماید. روشهای مختلفی برای بررسی این ساختار وجود دارد. در مرجع [۲] مدل پارامتری عناصر فشرده برای لایه آمده است که تحلیل میدانی با شبیه ساز HFSS و با شرایط مرزی تشعشی و هادی کامل انجام شده است. در مرجع [۳] هادیها با ضریب هدایت محدود و ضخامت غیر صفر با همان نرم افزار به نتایج بهتری منجر شده است. بدست آوردن مقدار عناصر فشرده تشکیل دهنده سوییچ و استخراج پارامترهای S با روشهای عددی نیز در منابع وجود دارد [۴].

در اینجا می خواهیم مدل دقیق و عملی برای این سوییچ MEMS در روی موجبر CPW در نظر گرفته و تمام ساختار را یکجا با تحلیل موجی کامل بررسی کرده و پارامترهای S را استخراج کنیم. از آنجائیکه CPW در این ساختار از هادیهای با ضخامتهای متفاوت ساخته شده است؛ تحلیل مورد نظر را در سه حالت: موج بر هم صفحه بدون لایه؛ لایه در موقعیت بالا یعنی حالت روشن و لایه در موقعیت پائین یعنی حالت خاموش انجام می دهیم. استخراج پارامترهای S با استفاده از میدانهای حاصل بعمل می آید.

مدل الکترو مغناطیسی برای سوییچ

ساختار سوییچ در عمل متشکل از دی الکتریک و رساناهای مختلف می باشد. شناخت رفتار الکترو مغناطیسی آن مستلزم حل معادلات ماکسول در نواحی مذکور با توجه به شرایط مرزی آنها خواهد بود. معادله

کمک نگاشت هم‌مدیس بوده و منجر به فرمولهای تجربی می‌گردد که بستگی فرکانسی در آنها منظور نشده و نیز ضخامت هادیها یکسان فرض می‌شود [۸،۷]. در سوئیچ MEMS ساخته شده بر روی CPW مناسب آن است که هادی وسطی نازکتر از هادیهای کناری ساخته شود در این حالت تحلیل موجی کامل ضروری به نظر می‌رسد. پهنای و فاصله هادیهای CPW بصورت $G/W/G = ۱۲۰/۸۰/۱۲۰$ (ابعاد همگی بر حسب میکرون هستند) و هادی مرکزی با ضخامت $۰/۴$ و هادیهای کناری با ضخامت ۴ و زیر لایه با ضخامت ۶۰۰ از جنس سیلیکن با ضریب دی الکتریک نسبی $۱۱/۹$ بوده و جنس هادیها آلومینیم با ضریب هدایت $۳/۸ \times ۱۰^۷$ زیمنس بر متر می باشد. جعبه ای به ابعاد $۶۰۰ \times ۱۲۰۰ \times ۶۰۰$ برای حل در نظر گرفته شده و پارامترهای S در محدوده فرکانسی $۱-۶۰$ GHz استخراج شده است. نتایج در شکل (۲) آمده است.

ب) سوئیچ در حالت روشن - لایه در موقعیت بالا

همانطور که ذکر شد یک لایه فلزی بالای هادی مرکزی و متصل به هادیهای کناری و بدون اعمال ولتاژ بایاس حالت روشن را ایجاد می نماید. با همان مشخصات بالا برای CPW لایه را با $L_m = ۳۲۰$ و پهنای $W_m = ۱۲۰$ و ضخامت $T_m = ۰/۴$ و ارتفاع آن $g_0 = ۳/۵$ از جنس آلومینیم در نظر می گیریم. دی الکتریک جداکننده دارای ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ و ضخامت $۰/۱$ و ضریب دی الکتریک نسبی ۷ می باشد. نتایج بصورت رسم پارامترهای S بر حسب فرکانس در شکل (۲c) دیده می شود که تقریبا همانند CPW بدون لایه می باشد.

ج) سوئیچ در حالت خاموش - لایه در موقعیت پائین

با اعمال ولتاژ در اثر نیروی الکترواستاتیکی لایه به پائین کشیده شده و به دی الکتریک بافر می چسبد در این موقعیت ظرفیت خازنی خیلی زیادی ایجاد و در نتیجه حالت خاموش سوئیچ بوجود خواهد آمد. با قطع ولتاژ بایاس در اثر خاصیت کشسانی؛ لایه به حالت اولیه می گردد. برای اینکه حالت واقعی لحاظ شده باشد؛ لایه را بصورت پلکانی در نظر می گیریم. پارامترهای S در شکل (۲b) دیده می شود. برای آنکه تصویری از عملکرد سوئیچینگ این ساختار داشته باشیم نتایج حالت‌های

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$$

(۳)

در صورت قابل قبول بودن جواب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی؛ حل نهائی بدست می آید. با استفاده از این حل امپدانس در دهانه های مشخص شده؛ از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$P = \int_s (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot ds \quad V = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$I = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad Z_{pv} = \frac{V \cdot V}{P}$$

$$Z_{vi} = \sqrt{Z_{pi} Z_{pv}} \quad Z_{pi} = \frac{P}{I \cdot I}$$

(۴)

امپدانس مشخصه در سه حالت؛ Z_{vi} برای مود TEM، Z_{pi} برای مدل میکرواستریپ و Z_{pv} برای موجبر هم صفحه مناسب می باشد. نحوه تحریک ساختار بعنوان سوئیچ بدین صورت است که هر دهانه تعریف شده به موجبری یکنواخت با همان سطح مقطع دهانه وصل می شود. در نتیجه میدان تحریک متناظر با میدان موجبر یکنواخت می باشد.

روش کار در HFSS با شبکه بندی تمام فضای مورد نظر با چهار وجهی شروع می شود. میدانها با توابع محلی در روی هر سطح چهار وجهی تقریب می گردد. در هر راس مولفه های مماسی بر سطوح متصل به آن راس ذخیره می شود. میدان در روی سطوح از طریق برازش از میدانهای معلوم رئوس مشخص می گردد. شبکه بندی اولیه با توجه به دقت در گامهای بعدی بصورت بهینه قابل تصحیح است سطح هاشور خورده وسط سطح روبروی آن دهانه های تحریک را نشان می دهند (شکل ۱). با استفاده از مقادیر میدانها؛ پارامترهای S (شکل ۲) و مشخصه های خط انتقال (شکل ۳) در حالت‌های مختلف استخراج می گردد.

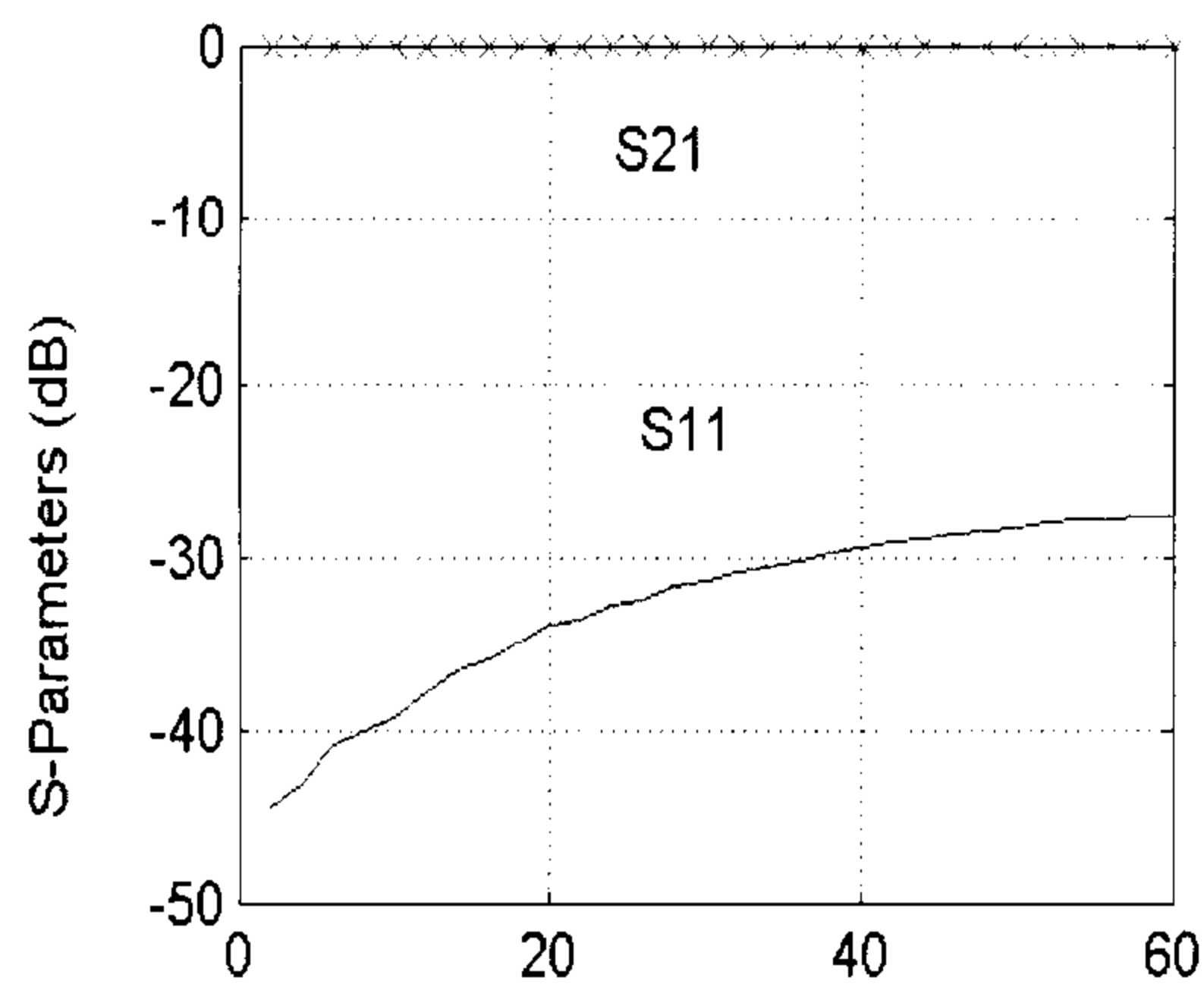
تحلیل موجی کامل و استخراج پارامترهای S

الف) موجبر هم صفحه با ضخامت های متفاوت هادی ها

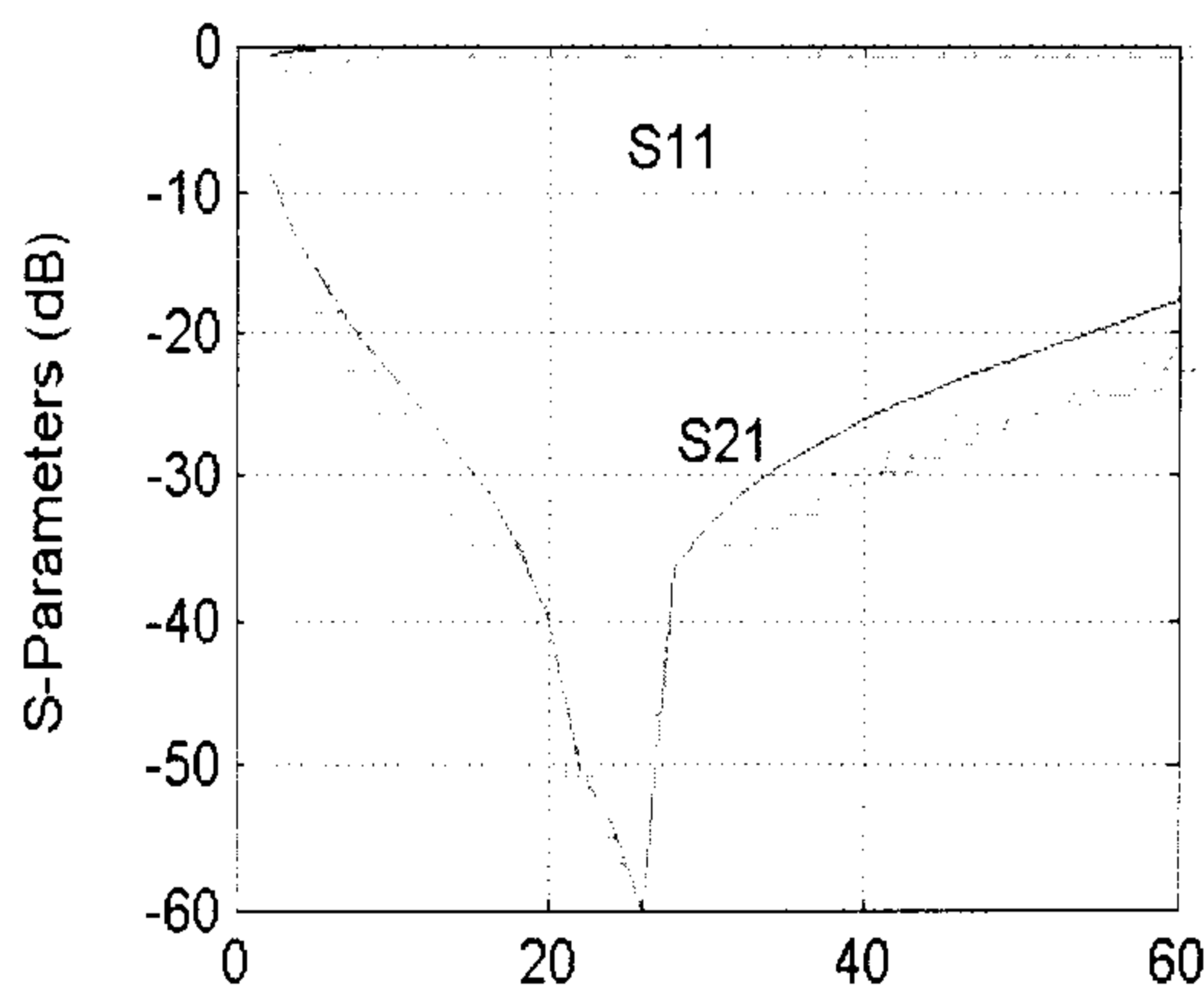
روشهای تحلیل این نوع موجبر عمدتاً در مود TEM^y و به

چنین ساختاری بعنوان موجبر مفید و امکانپذیر می باشد. از آنالیز موجی و میدانهای بدست آمده می توان کمیتهای توصیف کننده محیط موجبری از جمله ثابت تضعیف، ثابت انتشار و امپدانس را بدست آورد. در شکل (۳-ا) ثابت تضعیف بر حسب دسی بل در محدوده فرکانسی ۶۰-۱ GHz رسم شده است. دیده می شود که با توجه به فرض بدون تلفات بودن دی الکتریک ها اتلاف ناشی از ناقص بودن هادیها در سه حالت تفاوت قابل ملاحظه ای ندارند. ثابت انتشار برای سه حالت در شکل (۳-ب) در فرکانسهای مختلف دیده می شود. در این مورد منحنی ها در همه حالتها روی هم قرار گرفته اند و بصورت خطی با فرکانس تغییر می کنند که بیا نگر عدم وجود اعوجاج در سیگنال می باشد.

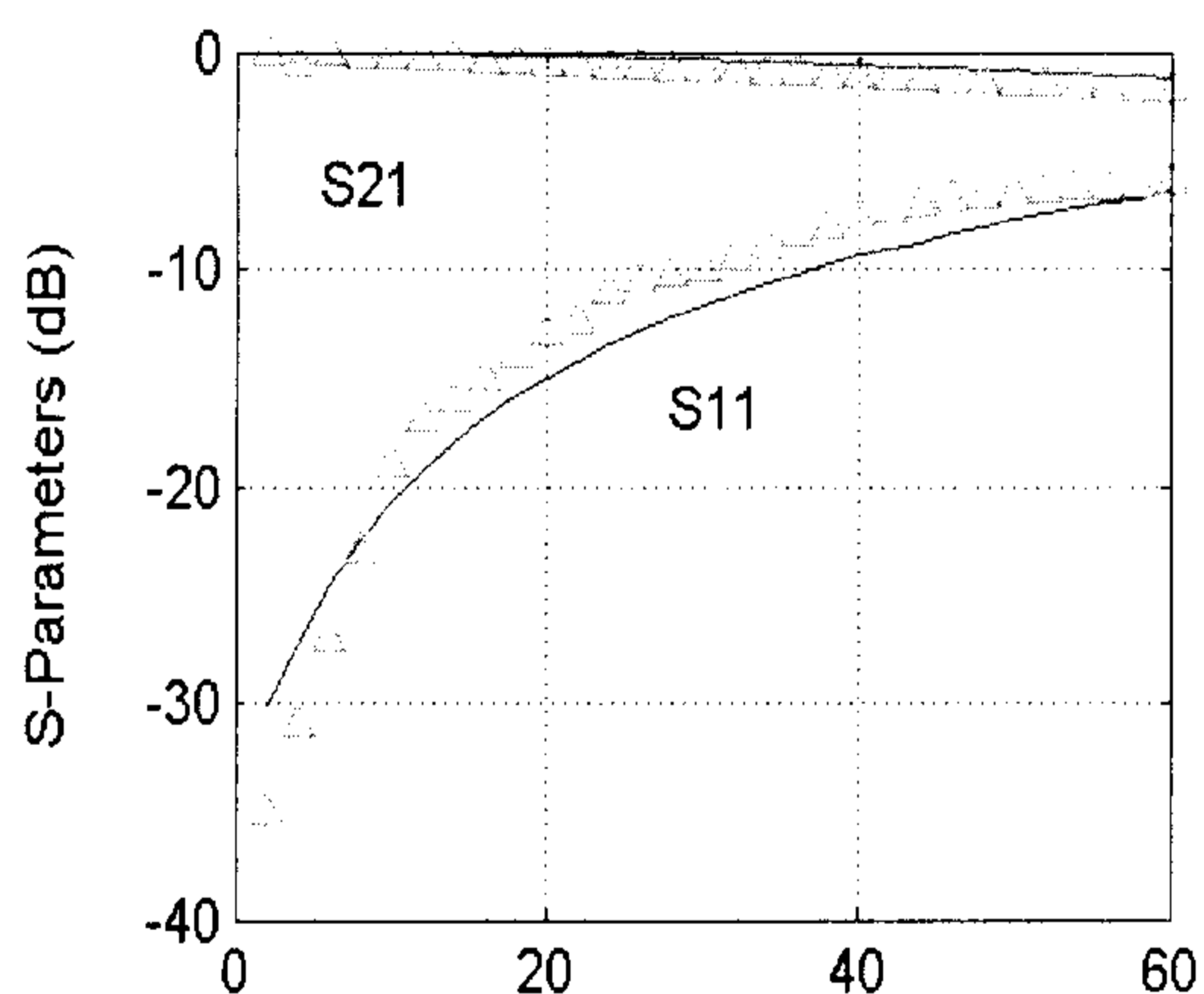
مختلف را در سه فرکانس ۵۰ و ۳۰ و ۱۰ GHz در جدول (۱) آورده ایم. از منحنی های شکل (۲) و جدول (۱) برآتی دیده می شود که در حالت روشن S_{12} تقریباً در تمام محدوده فرکانسی یک است یعنی تمام سیگنال عبور می کند و در حالت خاموش S_{12} خیلی کوچک بوده و این به مفهوم عدم عبور سیگنال می باشد. با در نظر گرفتن این خاصیت که از تحلیل دقیق میدانها بدست آمد میتوان این ساختار را بعنوان سوئیچ بکار برد. با توجه به اینکه معادلات میدان در ساختار سوئیچ MEMS در هر سه حالت با فرض اینکه بتوان آنرا خط انتقال تصور نمود حل گردید؛ یعنی معادله موج با لحاظ کردن رابطه (۲) فقط در مد انتشاری به جواب معتبر منجر می شود. بدست آوردن مشخصات انتشار موج در



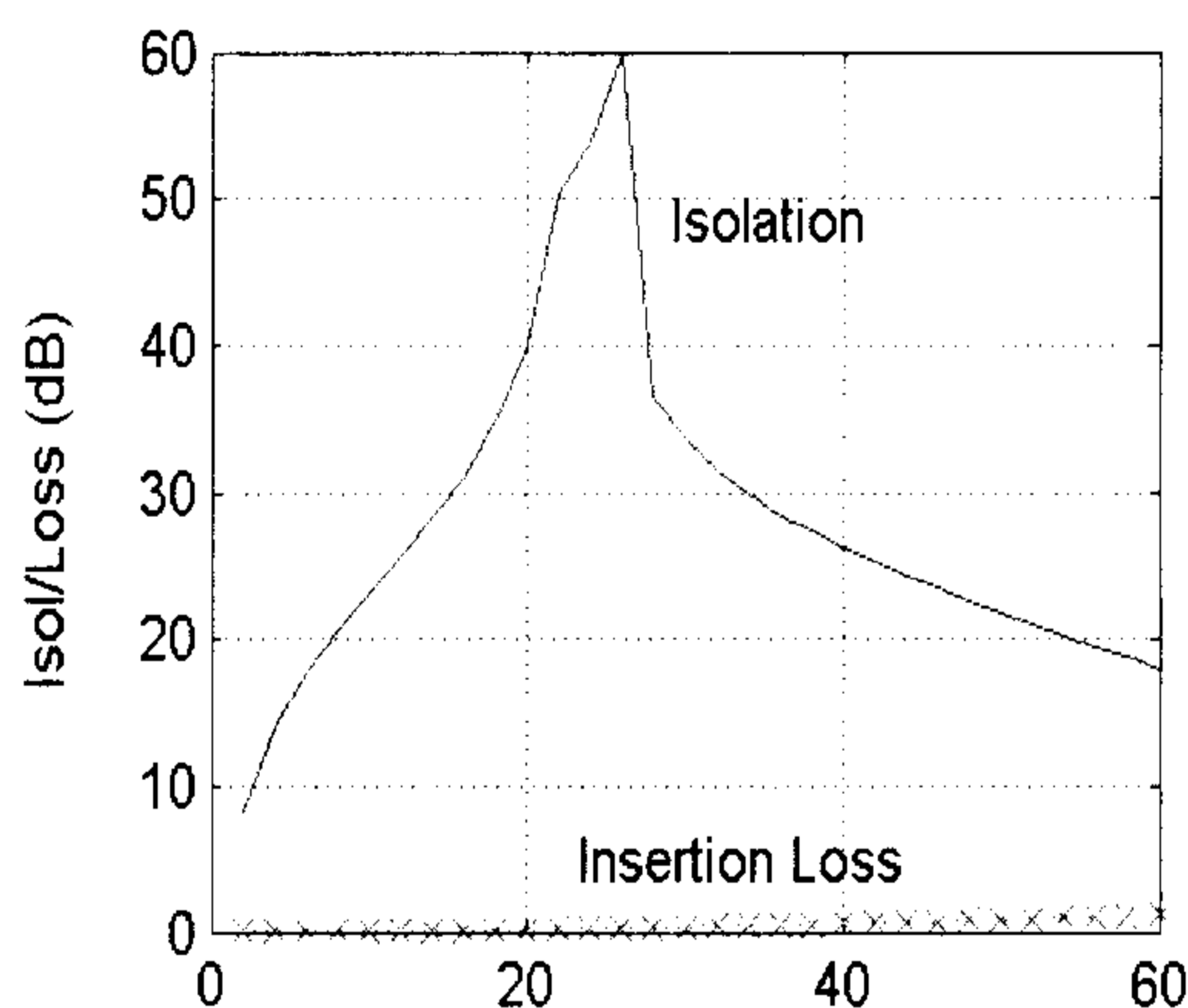
(a)



(b)



(c)

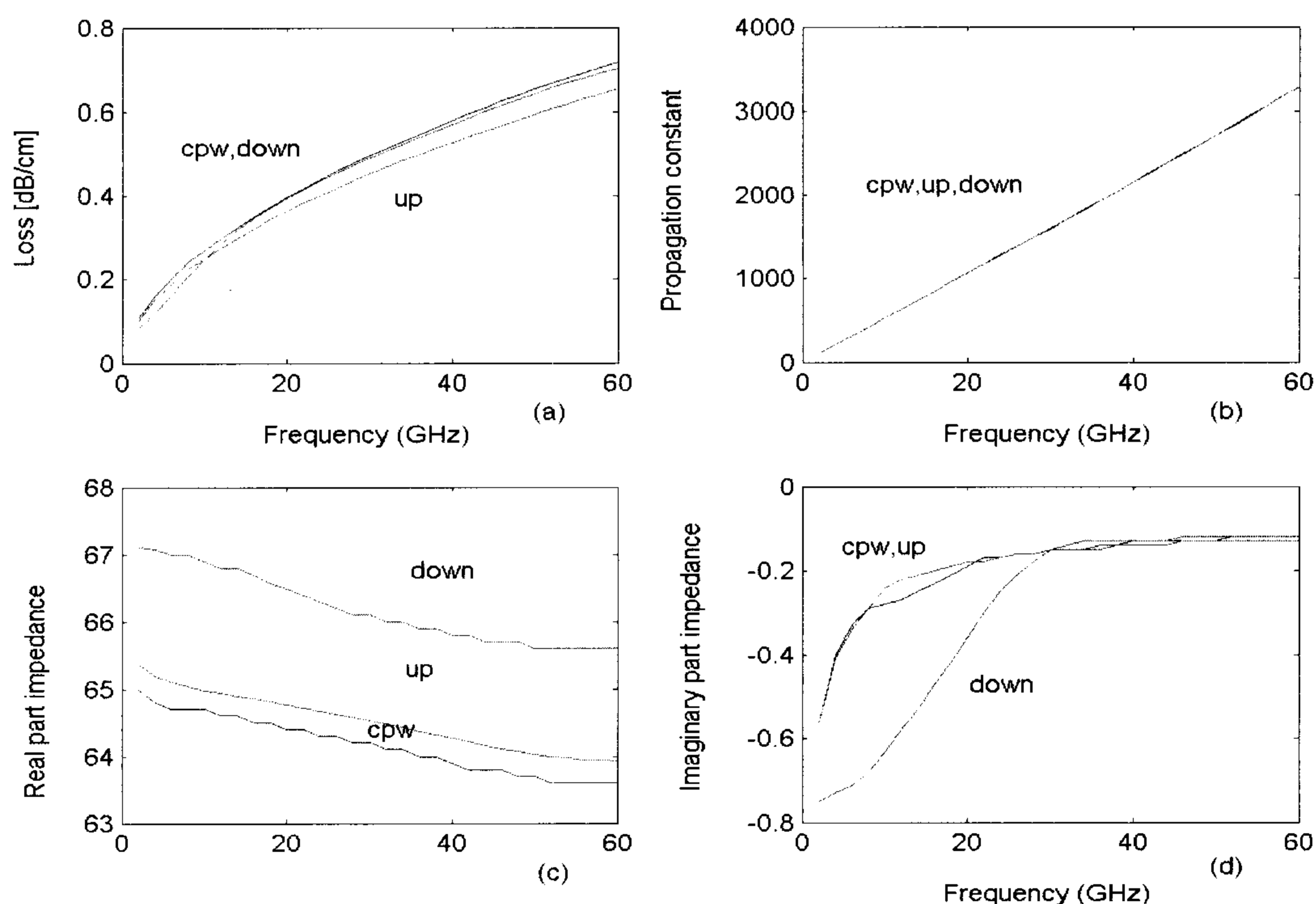


(d)

شکل ۲: پارامترهای S و مشخصات سوئیچ (a خط CPW (b سوئیچ در حالت خاموش: مثلث نتایج حاصل از مرجع [۳]) (c سوئیچ در حالت روشن: مثلث نتایج حاصل از مرجع [۳]) (d تلفات داخلی و ایزولاسیون سوئیچ.

جدول ۱: پارامترهای S در حالت‌های مختلف از آنالیز موجی کامل.

f[GHz]	CPW		سوئیچ MEMS (OFF)		سوئیچ MEMS (ON)	
	S _{۱۱}	S _{۲۱}	S _{۱۱}	S _{۲۱}	S _{۱۱}	S _{۲۱}
۱۰	۰/۰۱۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۳	۰/۰۶۹	۰/۰۹۲	۰/۹۹۲
۳۰	۰/۰۲۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۰۲۱	۰/۲۶۱	۰/۹۵۸
۵۰	۰/۰۳۹	۰/۹۹۴	۰/۹۸۷	۰/۰۰۸۱	۰/۴۱۲	۰/۹۰۲



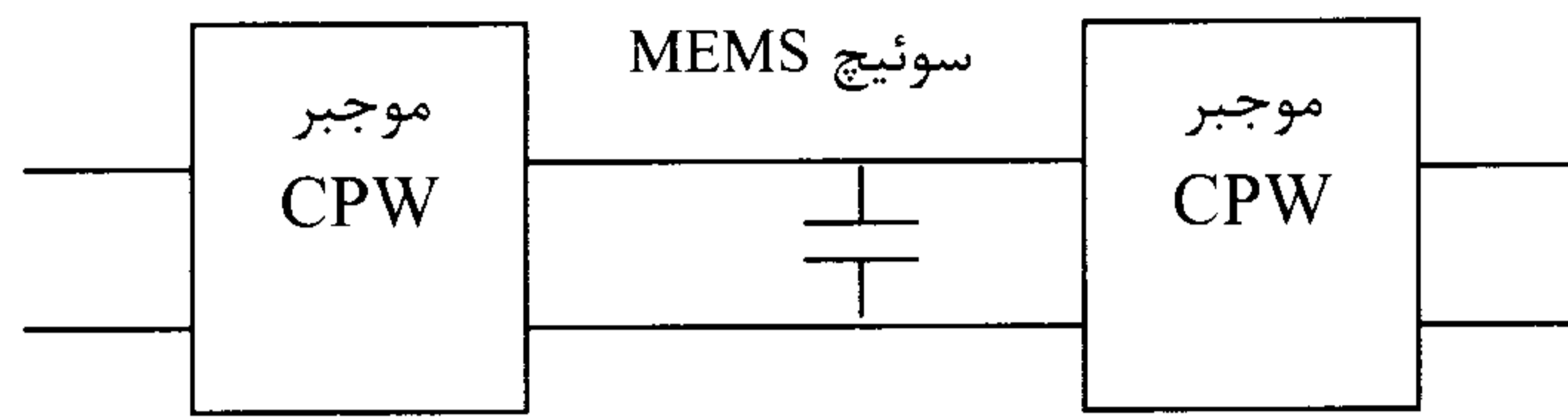
شکل ۳: کمیت‌های انتشار (a) ثابت تضعیف (b) ثابت انتشار (c) قسمت حقیقی امپدانس بر حسب اهم (d) قسمت موهومی امپدانس بر حسب اهم.

یک سوئیچ در بخش بعدی خواهد آمد.

مدل سوئیچ MEMS با خازن و خطوط انتقال

در منابع متعددی [۴ و ۵ و ۶] عملکرد کلی سوئیچ MEMS با مدل عناصر فشرده برای لایه و CPW دیده میشود بدین ترتیب که در حالت روشن و خاموش سوئیچ را با مدار RLC سری جایگزین نموده و با روشهای عددی مقادیر عناصر را محاسبه می کنند [۹، ۱۰]. از میان این عناصر خازن نقش اصلی را در عملکرد سوئیچ دارد و در تقریب اول براحتی میتوان ظرفیت آن را از رابطه خازن مسطح محاسبه نمود. از طرفی برای CPW نیز مدل‌های زیادی بر حسب عناصر فشرده در دسترس است بدین ترتیب با مشخص کردن ماتریس های ABCD و ضرب متوالی آنها و تبدیل های بین ماتریسهای انتقال و S

در شکل (۳- c) قسمت حقیقی امپدانس بر حسب فرکانس رسم شده است. تغییرات کم برای تطبیق امپدانس دارای اهمیت زیادی است. در حالت پائین لایه امپدانس کمی بیشتر است که با توجه به افزایش ظرفیت خازنی در این حالت با واقعیت سازگار است. و بالاخره قسمت موهومی امپدانس نیز در شکل (۳- d) دیده می شود که در سه حالت مقدار نزدیک به صفر در تمام محدوده فرکانسی دارد و این شرایط نیز در تطبیق مهم است با معلوم بودن مشخصات انتشار یعنی α, β, Z و پارامترهای S که همگی از میدان‌های حاصل از تحلیل موجی کامل بدست آمده اند؛ می توان سوئیچ MEMS را بعنوان دو قطبی در نظر گرفت و با استفاده از تئوری مدارهای میکروویو به همراه عناصر دیگر در طراحی بکار گرفت. کمیت‌های توصیف کننده چنین ساختاری بعنوان



شکل ۴: بلوک مداری خط انتقال CPW و سوئیچ موازی MEMS.

جدول ۲: پارامترهای S اجزاء و کل از روش مدل فشرده

F[GHz]	S	خط CPW	سوئیچ در حالت خاموش	سوئیچ در حالت روشن	کل در حالت خاموش	کل در حالت روشن
۱۰	S_{11}	۰/۰۰۸	۰/۹۹۵	۰/۰۶۲	۰/۹۹۹	۰/۰۷۰
	S_{21}	۰/۹۹۸	۰/۰۷۱	۰/۹۹۶	۰/۰۷	۰/۹۹۶
۳۰	S_{11}	۰/۰۱	۰/۹۹۹	۰/۰۳۴	۰/۹۹۹	۰/۱۹۵
	S_{21}	۰/۹۹۸	۰/۰۲۴	۰/۹۸۳	۰/۰۲۴	۰/۹۷۶
۵۰	S_{11}	۰/۱۳	۰/۹۹۹	۰/۰۸۹	۰/۹۹۳	۰/۳۰۶
	S_{21}	۰/۹۹۶	۰/۰۱۴	۰/۹۵۴	۰/۰۱۴	۰/۹۴۵

رفتن اتلاف می گردد.

نتیجه گیری

پارامترهای S در سه حالت را بر حسب فرکانس در شکل (۳) آورده ایم. جهت مقایسه نتایج شبیه سازی؛ نتایج مرجع [۳] را که در آن مقادیر پارامترهای S از دو طریق شبیه سازی و اندازه گیری بدست آمده اند در یک مختصات رسم کرده ایم. منحنی ها با علامت مثلث نتایج مرجع [۳] که براساس مدل RLC سری می باشد؛ را نشان می دهند. براحتی دیده میشود که تطبیق خیلی خوبی بین نتایج ما و مرجع مذکور وجود دارد که بطور غیر مستقیم با نتایج عملی هم تائید می گردد.

در بکار گیری سوئیچ MEMS در فرکانسهای مایکروویو و امواج میلیمتری از آنجائیکه این عنصر به همراه و در کنار قطعات دیگر خواهد بود؛ معلوم بودن پارامترهای S اجتناب ناپذیر است. در اینجا با روش تحلیل کامل و مدل فشرده که تطبیق خوبی نیز با هم دارند پارامترهای چنین ساختاری را به ازای ابعاد هندسی دلخواه و در فرکانس مورد نظر بدست آوردیم. دو فاکتور سوئیچ یعنی افت داخلی و ایزولاسیون در محدوده فرکانسی ۱-۶۰ GHz با

می توان پارامترهای S کل را بدست آورد. بلوک های تشکیل دهنده در شکل (۴) دیده می شود.

خازن حالت خاموش $8/92 \text{ pF}$ و خازن حالت روشن $0/36 \text{ pF}$

از رابطه $C = \frac{\epsilon L_m W_m}{g_0}$ بدست می آید. ماتریس

انتقال سوئیچ؛ ماتریس انتقال خط CPW و از ضرب آنها ماتریس انتقال کل و در نتیجه پارامترهای S براحتی محاسبه می شوند. نتایج در فرکانس ۵۰ و ۳۰ GHz و

۱۰ در جدول (۲) دیده می شود. بعنوان نمونه در فرکانس

۳۰ مقدار S_{21} در حالت روشن و خاموش از روش

تحلیل موجی کامل در جدول (۱) بترتیب ۰/۹۵۸ و

۰/۰۲۱ و از روش خازن به همراه خطوط انتقال در

جدول (۲)؛ ۰/۹۷۶ و ۰/۰۲۴ بدست آمده اند که تطبیق

خوبی با هم دارند. مقدار S_{11} در حالت روشن و خاموش

از روش موجی بترتیب ۰/۲۶۱ و ۰/۹۹۳ و از روش مداری

۰/۱۹۵ و ۰/۹۹۹ محاسبه شده اند. برای آنکه اثر ابعاد

هندسی در پارامترهای S معلوم گردد و در طراحی بتوان از

آنها کمک گرفت حساسیت آنها بر حسب پهنا و ارتفاع

لایه محاسبه شده است. با افزایش پهنای لایه تلفات

داخلی نیز زیاد می شود. و کاهش ارتفاع هم باعث بالا

همچنین توصیف سوئیچ با ماتریس S و معلوم بودن آن در طراحی کامپیوتری^۱ (CAD) از اهمیت بسزائی برخوردار است.

دقت بالا بدست آمد و در فرکانس ۲۶ GHz افت ۰/۳ dB و ایزولاسیون ۶۰ dB قابل دستیابی است که سوئیچ با کیفیت خیلی بالا نسبت به سوئیچهای موجود می باشد.

مراجع

- 1 - Katehi, L. P. B., Harvey, J. F. and Brown, E. (2002). "MEMS and micromachined circuits for High-Frequency applications." *IEEE MTT*, Vol. 50, No. 3, PP. 858-866.
- 2 - Qian, J. Y., Li, G. P. and De Flaviis, F. "A parametric model of MEMS capacitive switch operating at microwave frequencies." *IEEE Int. Microwave Symp. Digest*, Vol.2, PP. 1229-1232.
- 3 - Qian, J. Y., Li, G. P. and De Flaviis, F. (2001). "A parametric model of low-Loss RF MEMS capacitive switches." *IEEE, Proceedings of APMC2001*, Taipei, Taiwan, R.O.C.
- 4 - Muldavin, J. B. and Rebeiz, G. M. (2000). "High-Isolation CPW MEMS Shunt Switches Part 1: Modeling." *IEEE MTT*, Vol. 48, No. 6, PP. 1045-1052.
- 5 - Muldavin, J. B. and Rebeiz, G. M. (2000). "High-Isolation CPW MEMS shunt switches Part 2 : design ." *IEEE MTT*, Vol. 48, No. 6, PP. 1053-1056.
- 6 - Ulm, M. et al. (2003). "Millimeter-wave microelectromechanical (MEMS) switches for automotive surround sensing systems." *Digest of 2003 Topical meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, PP. 142-149.
- 7 - Simons, R. N. (2001). *Coplanar waveguide circuits, component and systems*. John Wiley & Sons, INC.
- 8 - Nguyen, C. (2002). *Analysis methods for RF, microwave, and millimeter-wave planar transmission line structures*. John Wiley & Sons, INC.
- 9 - Newman, G. S. (2002). "RF MEMS switches and applications." *IEEE, 40th Annual International Reliability Physics Symposium*, Dallas, Texas.
- 10 - Sloan, L. R., Sullivan, C. T., Tigges, C. P., Sandoval, C. E., Palmer, D. W., Hietala, S., Christenson, T. R., Dyck, C. W., Plut, T. A. and Schuster, G. R. (2001). "RF micromechanical switches that can be post processed on commercial MMICs." *IEEE, Electronic Components and Technology Conference*, Albuquerque, NM, PP. 111-115.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - MicroElectroMechanical Systems (MEMS)
- 2 - Microwave integrated circuits (MIC)
- 3 - Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMIC)
- 4 - Co-planar waveguide (CPW)
- 5 - High Frequency Structure Simulator (HFSS)
- 6 - Finite element method (FEM)
- 7 - Transverse electromagnetic (TEM)
- 8 - Computer Aided Design (CAD)

