

بسم الله الرحمن الرحيم

خطوط انتقال فعال در مخابرات الکترونیکی

(مدلسازی و تحلیل)

تالیف :

دکتر عبدالعلی عبدی پور

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر غلامرضا مرادی

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بهار ۱۳۹۳

سرشناسه : عبدی پور، عبدالعلی، ۱۳۴۵ -
 عنوان و نام پدیدآور: خطوط انتقال فعال در مخابرات الکترونیکی (مدلسازی و تحلیل) / تألیف
 عبدالعلی عبدی پور، غلامرضا مرادی.
 مشخصات نشر : تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۶.
 مشخصات ظاهری: ث، ۳۱۴ ص.: مصور (رنگی).
 شابک : 978-964-463-346-1
 وضعیت فهرست نویسی: فیبا.
 موضوع : مخابرات -- خطوط.
 موضوع : صوت -- انتقال.
 شناسه افزوده : مرادی، غلامرضا.
 شناسه افزوده : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
 رده بندی کنگره : ۱۳۸۶ غ ۶/۱۵/۱۰۳ TK5
 رده بندی دیویی : ۶۲۱/۳۸۲
 شماره کتابشناسی ملی : ۱۱۶۹۱۸۹



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 (پلی تکنیک تهران)

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۸۶/۲/۲۹ شورای چاپ و
 نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسیده است.

عنوان کتاب :	خطوط انتقال فعال در مخابرات الکترونیکی (مدلسازی و تحلیل)
مؤلف :	دکتر عبدالعلی عبدی پور - دکتر غلامرضا مرادی
ناشر :	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی چاپ و صحافی :	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ دوم :	بهار ۱۳۹۳
تیراژ :	۱۰۰۰ نسخه
قیمت :	۱۳۲۰۰ تومان
شابک :	۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۳۴۶-۱
	تلفن مرکز پخش : ۶۶۴۹۸۸۶۸
	ISBN : 978-964-463-346-1

آدرس : خیابان ولیعصر روبروی خیابان بزرگمهر ، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

این کتاب برای جلوگیری از انتشار غیر مجاز رمزگذاری شده است

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

پیشگفتار

فصل اول: روشهای مختلف تحلیل و مدلسازی ترانزیستورهای فرکانس بالا

۱-۱- مقدمه.....	۱
۱-۲- ساختار فیزیکی ترانزیستور FET میکروویو.....	۳
۱-۳- تحلیل و مدل سازی ترانزیستورهای فرکانس بالا.....	۷
۱-۴- مدل سازی فیزیکی الکترونیکی- الکترومغناطیسی.....	۱۵
۱-۵- مدل الکترومغناطیسی.....	۲۷
۱-۶- مدل سازی جامع مدارهای فرکانس بالا.....	۳۰
۱-۷- مراجع.....	۳۳

فصل دوم: ترانزیستور میکروویو/ موج میلی متری به عنوان خطوط انتقال فعال

تزویج شده

۱-۲- مطالعه تزویج فعال و غیرفعال یک FET توسط روش مدهای تزویج شده.....	۳۷
۲-۲- تحلیل مدال.....	۳۸
۲-۳- ادمیتانس مشخصه یک ساختار متشکل از سه خط تزویج شده.....	۴۳
۲-۴- بیان محاسبه ماتریسهای Γ و T بر حسب عناصر $[Z]$ و $[Y]$	۴۴
۲-۵- محاسبه ماتریس امیدانس.....	۴۶
۲-۶- تحلیل FETهای با گیت π شکل و محاسبه پارامترهای S دو دهانه معادل... ..	۴۹

۵۱	۷-۲- مدل سازی گسترده نویز
۵۴	۸-۲- محاسبه عددی پارامترهای الکترومغناطیسی مدل
۵۴	۹-۲- محاسبه پارامترهای اثر پوستی
۵۶	۱۰-۲- مشخص نمودن عناصر تزویج فعال
۵۷	۱۱-۲- نتایج تحلیل
۶۷	۱۲-۲- مراجع

فصل سوم: مدلسازی و تحلیل میدانی سیگنال و نویز FET در رژیم خطی

۷۰	۱-۳- بررسی یک خط انتقال تحریک شده
۷۲	۲-۳- تحلیل رفتار نویز ترانزیستور با روش تبدیل لاپلاس
۸۲	۳-۳- تحلیل رفتار نویز ترانزیستور با روش میدانی تابع گرین
۹۴	۴-۳- مراجع

فصل چهارم: تکنیکهای CAD مربوط به تحلیل موجی رفتار سیگنال و نویز

FET مایکروویو

۹۵	۱-۴- تحلیل موجی رفتار سیگنال و نویز FET مایکروویو با بکارگیری تکنیکهای CAD
۱۰۹	۲-۴- نتایج بررسی عملکرد ترانزیستور FET مایکروویو با روش تحلیل میدانی
۱۲۴	۳-۴- مراجع

فصل پنجم: مدلسازی غیرخطی و شبه گسترده ترانزیستور FET و بکارگیری

آن در طراحی چند نمونه مدار در رژیم غیرخطی

۱۲۶	 ۱-۵ مدل مداری سیگنال بزرگ FET
۱۳۲	 ۲-۵ مدل سازی شبه گسترده و غیر خطی ترانزیستور FET
۱۴۷	 ۳-۵ طراحی، مدلسازی و تحلیل اسیلاتور باند Ka به کمک مدل شبه گسترده ی غیرخطی
۱۷۱	 ۴-۵ تحلیل و مدل سازی میکسر مایکروویو به کمک مدل شبه گسترده غیرخطی
۱۷۶	 ۵-۵ مراجع

فصل ششم: مدلسازی و تحلیل غیر خطی خطوط انتقال فعال

۱۸۲	 ۱-۶ مدل گسترده خطی
۱۸۸	 ۲-۶ مدل گسترده غیر خطی
۱۹۳	 ۳-۶ الگوریتم کلی برای یافتن نقاط ولتاژ و جریان در کل بازه زمانی
۱۹۶	 ۴-۶ نتایج مدلسازی و تحلیل گسترده خطوط انتقال فعال تزویج شده
۲۲۶	 ۵-۶ مراجع

فصل هفتم: مدلسازی و تحلیل الکترونیکی-الکترومغناطیسی ترانزیستور FET

مایکروویو و موج میلی متری

۲۲۹	 ۱-۷ مقدمه
۲۳۴	 ۲-۷ روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)
۲۶۲	 ۳-۷ حل معادلات نیمه هادی به روش FDTD
۲۶۵	 ۴-۷ مدل انتقالی رانش- نفوذ
۲۶۸	 ۵-۷ مدل انتقالی هیدرودینامیکی

۲۷۸	FET ۶-۷- تحلیل موج کامل ترانزیستور
۲۹۶	ADI-FDTD ۷-۷- اعمال روش به تحلیل موج کامل
۳۰۵	۸-۷- مراجع

پیش‌گفتار

تمایل روزافزون به پردازش و انتقال اطلاعات زیاد با سرعت بیشتر باعث سوق دادن سیستم‌های الکترونیکی آنالوگ و دیجیتال در فرکانس‌های بالاتر و یا سرعت کلاک بیشتر شده است. از طرف دیگر، برای کاهش هزینه ساخت و تولید مدارهای الکترونیکی، شرکت‌های سازنده تمایل زیادی به سمت مدارهای مجتمع به شدت متراکم و فشرده از خود نشان می‌دهند. در چنین مدارهایی، قطعات فعال و غیرفعال زیادی در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند. به علت تزویج و حضور امواج سطحی و تشعشعی، اثرات مخرب زیادی بر روی کارایی مدار در فرکانس‌های بالا رخ خواهد داد. در چنین مواردی، مدل‌سازی و تحلیل عناصر فعال که عمده‌تاً ترانزیستورهای موج‌میلیمتری هستند به‌گونه‌ای که بتوان اثرات فرکانس بالا از قبیل تزویج امواج الکترومغناطیس، اثرات تشعشعی و عکس‌العمل متقابل موج-الکترون را کاملاً لحاظ نمود نقش فوق‌العاده مهمی در عملکرد کلی مدار بازی می‌کند.

در حال حاضر قطعات نیمه‌هادی با ابعاد چند میکرون و یا حتی زیرمیکرون^۱ معمولاً به عنوان ترانزیستورهای فوق سریع در تکنولوژی نیمه‌هادی در نظر گرفته می‌شوند. این قطعات قابلیت خاموش و روشن شدن در زمانی در حدود پیکوثانیه را دارا هستند. با داشتن چنین امکانی، می‌توان این قطعات را در وسائلی از قبیل آبرایانه‌ها، تقویت کننده-ها و سایر مدارهای میکروویو، سوئیچ‌های دیجیتال فوق سریع، تجهیزات اندازه‌گیری و وسائل دیگر به کار گرفت. ترانزیستور اثر میدانی با پیوند از نوع فلز-نیمه‌هادی^۲

^۱ Submicron

^۲ Metal Semiconductor Field Effect Transistor

(MESFET) و یا ترانزیستور با موبیلیتی الکترون زیاد^۱ (HEMT) را می‌توان در زمهری این گروه از قطعات فوق سریع دسته‌بندی نمود. این ترانزیستورها دارای سرعت زیاد، مصرف توان کم و پاسخ فرکانسی مناسب می‌باشند. لذا این‌گونه ترانزیستورها در کاربردهای سرعت بالا نسبت به قطعاتی که از تکنولوژی‌های دیگر از قبیل تکنولوژی CMOS استفاده می‌کنند دارای رجحان و برتری بیشتری هستند. و در نتیجه تحلیل دقیق این عناصر فعال در فرکانس‌های بالا به شدت احساس می‌شود.

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی ترانزیستورهای میکروویو و موج‌میلیمتری ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های مداری فشرده، نیمه‌گسترده، گسترده و سرانجام روش آنالیز موج کامل^۲ که اخیراً مطرح گردیده اشاره نمود. در آنالیز موج کامل که کامل‌ترین و دقیق‌ترین روش برای تحلیل ساختارهای فعال است به خوبی اثرات تزویج الکترومغناطیسی، پدیده انتشار و عکس‌العمل متقابل بین امواج الکترومغناطیس و حامل‌های بار در داخل نیمه‌هادی لحاظ شده و در نظر گرفته می‌شود. این نحوه‌ی مدل‌سازی، به خصوص در فرکانس‌هایی که ابعاد قطعه قابل مقایسه با طول موج باشد، هنگامی که سایر روش‌های تحلیل قادر به مدل‌سازی دقیق قطعه نیستند، بسیار دقیق عمل می‌نماید. در آنالیز موج کامل که بر پایه فیزیک قطعه استوار است دو دسته معادله، شامل معادلات حاکم بر نیمه‌هادی و معادلات ماکسول برای بررسی اثر متقابل امواج الکترومغناطیس بر روی حامل‌های بار، در نظر گرفته شده و همزمان حل می‌شوند.

از آنجا که کتاب خطوط انتقال غیرفعال که قبلاً توسط مولفین منتشر شده است جوابگوی مسائل مهم در ادوات و مدارات فعال میکروویو فرکانسهای بالا نمی‌باشد ضرورت تهیه کتاب خطوط انتقال فعال احساس شده است. خطوط انتقال فعال که با حضور ترانزیستور موج میلی‌متری و فناوری MMIC مصداق پیدا نموده‌اند عمدتاً به ساختارهای ادوات فعال موج میلیمتری اطلاق می‌شود. روند رو به رشد فناوری موج میلیمتری و ویژگیهای ممتاز آن از جمله دسترسی به پهنای وسیع و فوق‌العاده وسیع، کاهش حجم و ابعاد مدار، امنیت مناسب، سرعت بالای انتقال اطلاعات باعث شده است که امروزه بحث خطوط انتقال فعال به موضوعی داغ حداقل در سطح مقالات و کنفرانسهای علمی تبدیل شود. متأسفانه در این رابطه منبعی مناسب در داخل کشور و

¹ High Electron Mobility Transistor

² Full-Wave Analysis

یا حتی خارج از کشور که به موضوع خطوط انتقال با محتوایی که در این کتاب ارائه شده است مشاهده نگردید. لذا همچنانکه در کتاب قبلی مولفان مطرح گردید بر آن شدیم تا موضوع خطوط انتقال را به بحث وسیع‌تری از جمله ادوات فعال الکترونیکی فرکانس بالا توسعه دهیم تا پل ارتباطی‌ای بین دو شاخه‌ی علوم یعنی الکترونیک و الکترومغناطیس برقرار گردد و علاقمندان بتوانند در این وادی که هنوز مسائل خیلی مهمی جهت حل و فصل وجود دارد گام نهند.

محتوای کتاب در هفت فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

فصل یک به عنوان مقدمه بحث، به روشهای مختلف تحلیل و مدلسازی ترانزیستورهای فرکانس بالا اشاره مینماید. در فصل دوم، ترانزیستور مایکروویو و موج میلی متری به عنوان خطوط انتقال فعال تزویج شده معرفی شده و تجزیه و تحلیل و مباحث میدانی آن بررسی می‌شود. فصل سه به تجزیه و تحلیل رفتار توام سیگنال و نویز FET در رژیم خطی به روش میدانی می‌پردازد. به منظور آشنایی با CAD سیگنال و نویز از دیدگاه موجی فصل چهار در این رابطه در نظر گرفته شده است. با توجه به عملکرد غیرخطی مدارات و زیرسیستمهای ترانسیورها به خصوص ترانسیور موج میلیمتری، موضوع مدلسازی غیرخطی یک نمونه ترانزیستور مایکروویو و کاربرد آن در نمونه‌هایی از مدارات غیرخطی با تاکید بر مدل‌های فشرده و شبه‌گسترده، فصل پنجم این موضوع را پوشش می‌دهد. در فصل ششم، مدلسازی غیرخطی ترانزیستور به عنوان خط انتقال فعال در رژیم غیرخطی و بر اساس مدل تمام گسترده مورد مطالعه قرار میگیرد و نتایج مربوطه ارائه می‌شود و در نهایت در فصل آخر بحث تحلیل و مدلسازی موج کامل ترانزیستور با تلفیق مدل‌های الکترونیکی و الکترومغناطیسی مطرح می‌گردد.

لازم می‌دانیم که از دانشجویان و فارغ‌التحصیلان دوره‌ی تحصیلات تکمیلی آزمایشگاه تحقیقاتی مایکروویو/موج میلی‌متری و مخابرات بدون سیم دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر از جمله آقایان دکتر مسعود موحدی، مهندس حمید وحدتی، مهندس کامبیز افروز، مهندس رامین خسروی، مهندس آیدین تائب، مهندس فواد ارفعی، مهندس رشید میرزوند، مهندس واعظی و خانم مهندس تکوک که در تدوین و بازبینی مطالب کتاب ما را یاری نمودند تشکر نماییم.

همچنین از مسئولین محترم دانشگاه صنعتی امیرکبیر و به خصوص پرسنل محترم مرکز نشر دانشگاه که زحمات بررسی و چاپ کتاب را متقبل شده‌اند کمال تشکر را داریم.

بی شک نقطه نظرات و پیشنهادات خوانندگان محترم ما را در ارائه بهتر چاپ‌های بعدی
کتاب یاری خواهد کرد.

غلامرضا مرادی

استادیار دانشکده مهندسی برق

ghmoradi@aut.ac.ir

عبدالعلی عبدی‌پور

استاد دانشکده مهندسی برق و قطب علمی

سیستم‌های مخابرات رادیویی

abdipour@aut.ac.ir

روش‌های مختلف مدل‌سازی و تحلیل ترانزیستورهای فرکانس بالا

۱-۱- مقدمه

آنالیز و مدل‌سازی ترانزیستور به عنوان مهمترین بخش مدارهای الکترونیکی، جزء بحث‌های مهم و کلیدی در طراحی مدارها می‌باشد. معمولاً هنگامیکه فرکانس کاری مدار و به تبع آن فرکانس کاری ترانزیستور پایین باشد، از مدل فشرده برای مدل‌سازی آن و طراحی مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شود، ولی صحت و دقت این مدل‌ها با افزایش فرکانس و قابل مقایسه شدن ابعاد ترانزیستور با طول موج کاهش یافته و لزوم استفاده از مدل‌های اصلاح شده، احساس می‌گردد. در این فصل سعی بر این است که مدل‌ها و روش‌های مختلفی که برای تحلیل و مدل‌سازی ترانزیستورهای میکروویو و موج میلیمتری مورد استفاده قرار می‌گیرند معرفی شوند. این امر به دلیل اینکه ترانزیستورها پایه اصلی خطوط انتقال فعال می‌باشند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ابتدا اشاره مختصری به ساختار فیزیکی ترانزیستورهای اثر میدانی، MESFET و HEMT که عمدتاً در فرکانسهای مایکروویو و موج میلیمتری مورد استفاده قرار می-گیرند، خواهیم کرد. سپس روشها و مدلهای مورد استفاده برای تحلیل و شبیه سازی ترانزیستورهای فرکانس بالا معرفی می-گردند. این مدلها به سه گروه عمده شامل مدل-های فشرده، مدلهای گسترده و مدل الکترونیکی-الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می-گردند. درباره دو مدل اول، توضیح مختصری ارائه گردیده و در مورد روش تحلیل سوم که به نام آنالیز موج کامل^۱ ترانزیستور نیز شناخته می-شود به تفصیل مطالبی بیان خواهد شد. همچنین مدلهای فیزیکی مختلف ترانزیستور و نحوه استخراج آنها بیان شده و معادلات حاکم بر این مدلها ارائه می-گردند. نحوه استفاده از معادلات ماکسول جهت لحاظ کردن بحث انتشار موج در داخل ساختار ترانزیستور، همچنین نحوه تزویج معادلات ماکسول با معادلات مدل فیزیکی ترانزیستور، سایر مطالب این بخش را تشکیل خواهد داد.

همچنین در ادامه‌ی این فصل، اشاره مختصری به بحث تحلیل مدارهای فرکانس بالا خواهیم داشت. تمایل روز افزون به پردازش و انتقال حجم بسیار زیادی از اطلاعات در زمان اندک، احتیاج به طراحی سیستمهای الکترونیکی آنالوگ و دیجیتال برای کار در فرکانسهای بالاتر و یا کلاک سریعتر را باعث شده است. علاوه بر این، از نظر اقتصادی نیز رویکرد دائمی در جهت تولید محصولات با قیمت ارزانتر وجود دارد. از دیدگاه مداری، این موضوع به طراحی مدارهای مجتمع با میزان فشردگی بسیار زیاد از قبیل مدارهای مجتمع یکپارچه‌ی مایکروویو (MMIC^۲) منجر شده است. این مدارهای بسیار فشرده، شامل قطعات فعال و غیر فعال نزدیک به هم، با انواع مختلفی از خطوط انتقال و ناپیوستگی‌ها هستند. در این‌گونه مدارها ممکن است کارایی سیستم به شدت به علت چگالی زیاد مدار کاهش یابد. علت این امر را می‌توان در وجود اثرات ناخواسته‌ای از قبیل هم‌شنوایی^۳ که ناشی از تزویج، امواج سطحی و تشعشعات است، جستجو نمود. علاوه براین، پیچیدگی سیستمهای مایکروویو و موج میلیمتری نیز روز به روز با وجود

^۱ Full-Wave Analysis

^۲ Monolithic Microwave Integrated Circuits

^۳ Cross Talk

آمدن سیستم‌های توزیع شده و گسترده رو به افزایش است. در این گونه سیستم‌ها، محیط الکترومغناطیس اصلی‌ترین و مهم‌ترین بخش مدار بوده و تزویج بین امواج الکترومغناطیس و سایر قسمت‌های مدار باید به صورت کامل جهت تحلیل در نظر گرفته شود. این ملاحظات ایجاب می‌کند که ابزارهای طراحی و روش‌های آنالیز، تمام بخش-های مدار را که شامل قطعات فعال، اجزاء غیرفعال، عناصر تشعشع کننده و سایر قسمت‌ها می‌باشند را به صورت همزمان در نظر گرفته و تحلیل نمود. این روش، به عنوان مدل‌سازی جامع^۱ مدارها شناخته می‌شود.

۱-۲- ساختار فیزیکی ترانزیستور FET مایکروویو

شرط لازم برای ارائه مدل مناسبی از ترانزیستور این است که شناخت کافی از مشخصات فیزیکی و ساختار هندسی آن داشته باشیم. یک مدل، اساساً منعکس‌کننده این موضوع است که رفتار فیزیکی قطعه‌ای که مورد مدل‌سازی قرار می‌گیرد به چه صورت است. هر اندازه فهم مدل‌کننده از این رفتار فیزیکی بیشتر باشد و با ساختار فیزیکی قطعه آشناتر باشد، بالطبع مدل ارائه شده نیز دقیق‌تر و جامع‌تر خواهد بود. اگر چه مشخصات فیزیکی و عملکرد ترانزیستورهای FET با توجه به کاربرد آنها در مدارات متفاوت می‌باشد، ولی دارای ساختار کلی مشابه هستند. به طور کلی این ترانزیستورها متشکل از سه هادی موازی گیت، درین و سورس بوده که بر روی یک بستر نیمه هادی قرار می‌گیرند و هر یک با زمین، یک خط انتقال مایکرواستریپ را تشکیل می‌دهند.

در اینجا باید به این نکته اشاره کنیم که در این کتاب تاکید بیشتر بر روی ترانزیستورهای اثر میدانی FET^۲ است که شامل ترانزیستور^۳ MESFET و HEMT^۴ می‌شود. دلیل توجه خاص بر این ترانزیستور، کاربرد فراوان آن در فرکانس بالا است. البته بدون اینکه از کلیت مسئله کاسته شود می‌توان روشهای ارائه شده را برای سایر ادوات از جمله HBT و BJT تعمیم داد. بنابراین، به غیر از مواردی که صراحتاً به نوع ترانزیستور اشاره شده در سایر موارد منظور از ترانزیستورهای فرکانس بالا،

^۱ Global Modeling

^۲ Field Effect Transistors

^۳ Metal-Semiconductor Field Effect Transistor

^۴ High Electron Mobility Transistor