

بسم الله الرحمن الرحيم

ترانزیستورهای اثر میدانی فرکانس بالا

(مدلسازی و تحلیل الکترونیکی - الکترو مغناطیسی)

تصنیف:

دکتر عبدالعلی عیدی پور

(استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دکتر رشید میرزاوند بروجنی

(عضو هیئت علمی پژوهشکده مخابرات و الکترو مغناطیس کاربردی دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دی ماه ۱۳۹۱

سرشناسه	: عبدی‌پور، عبدالعلی، ۱۳۴۵ .
عنوان و نام پدیدآور	: ترانزیستورهای اثر میدانی فرکانس بالا (مدلسازی و تحلیل الکترونیکی- الکترومغناطیسی) / تصنیف عبدالعلی عبدی‌پور، رشید میرزاوندی و جنی.
مشخصات نشر	: تهران : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	: ۳۶۰ ص.
شابک	: 978-964-463-500-7
وضعیت فهرست نویسی	: کپیا
موضوع	: میدان‌های الکترومغناطیس -- ریاضیات
موضوع	: تحلیل حوزه‌زمان
شناسه افزوده	: میرزاوندی، رشید
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
رده بندی کنگره	: QC۴۴۵ / م۹۴۲۴ / ۱۳۹۱
رده بندی دیویی	: ۵۳۰ / ۱۲۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۰۳۷۹۰



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)



کتاب	: ترانزیستورهای اثرمیدانی فرکانس بالا (مدلسازی و تحلیل الکترونیکی - الکترومغناطیسی)
تصنیف	: دکتر عبدالعلی عبدی‌پور - دکتر رشید میرزاوندی و جنی
ناشر	: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی چاپ و صحافی	: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اول	: دی ماه ۱۳۹۱
تیراژ	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۱۵۰۰۰ تومان
تلفن مرکز یخش	: ۶۶۴۹۸۸۶۸
شابک	: ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۵۰۰-۷
	: ISBN : 978-964-463-500-7

آدرس : خیابان ولیعصر رو بروی 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

عنوان

صفحه

I. پیشگفتار.....

فصل ۱: روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)..... ۱

۱-۱- مقدمه..... ۱

۱-۲- تقریب‌های تفاضل محدود برای مشتق‌ها..... ۳

۱-۳- حل معادلات ماکسول به روش FDTD..... ۷

۱-۴- پراکندگی عددی و پایداری..... ۱۳

۱-۵- شرایط مرزی جذب..... ۱۵

۱-۵-۱- شرایط مرزی جذب مور مرتبه اول..... ۱۵

۱-۵-۲- شرط مرزی جذب واپاشنده..... ۱۶

۱-۵-۳- شرط مرزی جذب لایه تطبیق کامل (PML)..... ۱۷

۱-۶- مدل‌سازی منبع..... ۲۲

۱-۷- کمیت‌های مداری خطوط انتقال در تحلیل FDTD..... ۲۵

۱-۷-۱- امپدانس و ضریب انعکاس..... ۲۶

۱-۷-۲- پارامترهای پراکندگی S..... ۲۸

۱-۷-۳- عناصر مدار فشرده در تحلیل FDTD..... ۳۱

۱-۸- خلاصه..... ۳۶

۱-۹- مراجع..... ۳۷

فصل ۲: تحلیل خطوط انتقال غیرفعال به روش FDTD..... ۳۹

۲-۱- مقدمه..... ۳۹

۲-۲- تحلیل خطوط انتقال غیرفعال توسط روش FDTD..... ۴۸

۲-۲-۱- اعمال روش FDTD بر معادلات MTL..... ۴۸

۲-۲-۲- شبیه‌سازی خطوط انتقال تزویج شده بدون تلف در حوزه زمان..... ۵۶

۳-۲- شیبۀ سازی خطوط انتقال تزویج شده تلفدار در حوزه زمان.....	۶۰
۳-۲-۱- اعمال روش FDTD بر معادلات MTL تلفدار.....	۶۰
۳-۲-۲- نتایج حاصل از شیبۀ سازی خطوط انتقال تلفدار.....	۶۷
۳-۲-۴- شیبۀ سازی خطوط انتقال باریک شونده.....	۷۰
۳-۲-۵- خلاصه.....	۷۴
۳-۲-۶- مراجع.....	۷۵
فصل ۳: مدلسازی و تحلیل میدانی (گسترده) ترانزیستور فرکانس بالا در رژیم خطی....	
۳-۱- مقدمه.....	۷۷
۳-۲- استخراج معادلات AMTL.....	۷۸
۳-۳- اعمال روش FDTD به مدل تمام گسترده خطی.....	۸۴
۳-۳-۱- گستره سازی معادلات AMTL در حوزه زمان.....	۸۴
۳-۳-۲- شرایط مرزی در معادلات AMTL.....	۸۵
۳-۳-۳- نتایج شیبۀ سازی تمام گسترده ترانزیستور در حالت خطی.....	۹۰
۳-۴- بررسی اثر گستردگی در الکتروود سورس.....	۹۹
۳-۵- بررسی اثر محل بارگذاری و تحریک در عملکرد خطی ترانزیستور.....	۱۰۸
۳-۴-۱- مدلسازی خطوط انتقال فعال تلفدار در حوزه زمان.....	۱۱۲
۳-۴-۱-۱- استخراج معادلات AMTL تلفدار.....	۱۱۲
۳-۴-۱-۲- حل معادلات AMTL تلفدار در حوزه زمان.....	۱۱۵
۳-۴-۱-۳- شرایط مرزی معادلات AMTL تلفدار در حوزه زمان.....	۱۱۷
۳-۴-۱-۴- نتایج حاصل از شیبۀ سازی خطوط انتقال تلفدار در حوزه زمان.....	۱۱۹
۳-۵- مدل‌های ترانزیستورهای ماسفت (MOSFET).....	۱۲۷
۳-۵-۱- مدل BSIM3.....	۱۳۰
۳-۵-۲- مدل BSIM4.....	۱۳۱
۳-۵-۳- معادلات غیرخطی مدل مورد استفاده ماسفت RF.....	۱۳۲
۳-۶- خلاصه.....	۱۳۷
۳-۷- مراجع.....	۱۳۸

فصل ۴ : مدلسازی و تحلیل میدانی (گسترده) ترانزیستور فرکانس بالا در رژیم

غیرخطی	۱۳۹
۱-۴- مقدمه	۱۳۹
۲-۴- استخراج معادلات NAMTL	۱۴۰
۱-۲-۴- حل معادلات NAMTL در حوزه زمان با استفاده از روش FDTD	۱۴۶
۲-۲-۴- حل معادله غیرخطی $FNL=0$	۱۵۰
۳-۲-۴- شرایط مرزی	۱۵۱
۳-۴- نتایج شبیه سازی تمام گسترده ترانزیستور در رژیم غیرخطی	۱۵۷
۴-۴- بررسی اثر محل تحریک و بارگذاری در رفتار ترانزیستور	۱۶۵
۵-۴- بررسی اثر عناصر پارازیتی در انتهای مدار باز و اتصال کوتاه الکترودها	۱۶۹
۶-۴- خلاصه	۱۷۱
۷-۴- مراجع	۱۷۲

فصل ۵ : مدلسازی و تحلیل تمام موج ترانزیستور فرکانس بالا

۱-۵- مقدمه	۱۷۳
۲-۵- حل معادلات نیمه هادی به روش FDTD	۱۷۴
۱-۲-۵- مدل هیدرودینامیک	۱۷۵
۲-۲-۵- مدل رانش-پخش (DD)	۱۷۹
۳-۲-۵- پایداری عددی	۱۸۳
۳-۵- تحلیل تمام موج ترانزیستور MESFET به روش FDTD	۱۸۴
۱-۳-۵- تحلیل DC	۱۸۶
۲-۳-۵- تحلیل AC	۱۸۸
۴-۵- خلاصه	۱۹۵
۵-۵- مراجع	۱۹۶

فصل ۶ : تسریع فرآیند مدلسازی و تحلیل تمام موج ترانزیستور فرکانس بالا به کمک

موجک و فیلتر بانک	۱۹۷
-------------------	-----

۱۹۷	۱-۶- مقدمه
۱۹۸	۲-۶- استفاده از موجک در روش‌های عددی
۱۹۸	۱-۲-۶- موجک‌ها
۱۹۸	۲-۲-۶- ایجاد شبکه غیریکنواخت توسط موجک درونیاب
۱۹۹	۳-۲-۶- نتایج عددی تحلیل FET با استفاده از موجک
۲۰۶	۳-۶- تحلیل تمام موج با استفاده از فیلتر بانک
۲۰۸	۱-۳-۶- خوش‌حالت‌کنندگی بر پایه فیلتر بانک
۲۰۹	۲-۳-۶- تبدیل مای فیلتر بانک
۲۱۲	۳-۳-۶- ساختن خوش حالت‌کننده
۲۱۵	۴-۳-۶- تحلیل پیچیدگی خوش حالت‌کننده فیلتر بانک
۲۱۷	۵-۳-۶- نتایج عددی تحلیل FET با استفاده از فیلتر بانک
۲۱۸	۱-۵-۳-۶- شرط مرزی دیریکله
۲۲۱	۲-۵-۳-۶- شرط مرزی ترکیبی نویسن و دیریکله
۲۲۵	۴-۶- خلاصه
۲۲۶	۵-۶- مراجع

فصل ۷: تسریع فرآیند مدلسازی و تحلیل تمام موج ترانزیستور فرکانس بالا به کمک

۲۲۷	روش‌های ضمنی
۲۲۷	۱-۷- مقدمه
۲۲۹	۲-۷- تحلیل تمام موج با روش نیمه ADI-FDTD (HADI-FDTD)
۲۲۹	۱-۲-۷- روش ADI-FDTD برای معادلات ماکسول
۲۳۳	۲-۲-۷- پیاده‌سازی CFS-PML در روش ADI-FDTD
۲۳۵	۳-۲-۷- روش HADI-FDTD در تحلیل تمام موج
۲۳۷	۳-۷- تحلیل تمام موج با روش تمام ADI-FDTD (FADI-FDTD)
۲۳۷	۱-۳-۷- حل معادلات نیمه هادی DD به روش ADI-FDTD
۲۴۲	۲-۳-۷- معادله پواسن اصلاح شده
۲۴۳	۳-۳-۷- روش FADI-FDTD در تحلیل تمام موج

۲۴۴	۷-۴- تحلیل تمام موج با روش LOD-FDTD
۲۴۴	۷-۴-۱- روش LOD-FDTD برای معادلات ماکسول
۲۵۰	۷-۴-۲- حل معادلات نیمه هادی (DD) به روش LOD-FDTD
۲۵۲	۷-۴-۳- روش تمام LOD-FDTD (FLOD-FDTD) در تحلیل تمام موج
۲۵۲	۷-۵- نتایج شبیه سازی روش های مختلف این فصل
۲۵۷	۷-۶- خلاصه
۲۵۸	۷-۷- مراجع

فصل ۸: تسریع فرآیند مدلسازی و تحلیل تمام موج ترانزیستور فرکانس بالا به کمک

۲۵۹	روش های بدون شبکه
۲۵۹	۸-۱- مقدمه
۲۶۱	۸-۲- تحلیل معادلات نیمه هادی به روش بدون شبکه
۲۶۱	۸-۲-۱- اصول روش بدون شبکه بر مبنای توابع پایه شعاعی
۲۶۳	۸-۲-۲- حل معادلات نیمه هادی به روش بدون شبکه
۲۶۵	۸-۲-۳- اعمال بایاسهای DC و محاسبه پاسخ پایدار
۲۷۰	۸-۳- حل معادلات نیمه هادی با روش FDLTD
۲۷۰	۸-۳-۱- اصول پایه تبدیل لاگر
۲۷۲	۸-۳-۲- روش FDLTD برای حل معادلات نیمه هادی
۲۷۶	۸-۳-۳- ارزیابی نتایج روش FDLTD برای تحلیل معادلات نیمه هادی
۲۷۷	۸-۴- حل معادلات ماکسول با روش FDLTD
۲۷۷	۸-۴-۱- بیان معادلات ماکسول در حوزه لاگر
۲۸۱	۸-۴-۲- شرایط مرزی جذب در روش FDLTD
۲۸۵	۸-۴-۳- حل همزمان معادلات با روش ترکیبی ADIFDTD+FDLTD
۲۸۷	۸-۴-۴- حل معادلات ماکسول با روش MFLTD
۲۹۴	۸-۱- خلاصه
۲۹۵	۸-۲- مراجع

فصل ۹: مدل‌سازی، طراحی، تحلیل و بررسی پایداری مدارات فرکانس بالا..... ۲۹۷

۹-۱- مقدمه..... ۲۹۷

۹-۲- تحلیل خطی تقویت کننده متوازن در باند فرکانسی K ۲۹۸

۹-۳- تحلیل غیرخطی تقویت کننده توان در باند فرکانسی V ۳۰۱

۹-۳-۱- تعیین مدل مداری غیرخطی مناسب برای ادوات فعال در تحلیل..... ۳۰۱

۹-۳-۲- تخصیص دهانه ها..... ۳۰۲

۹-۳-۳- تشکیل معادله توازن هارمونیکی..... ۳۰۳

۹-۳-۴- حل معادله توازن هارمونیکی..... ۳۰۵

۹-۳-۵- نتیجه شبیه سازی تقویت کننده در باند فرکانسی V ۳۰۸

۹-۴- تحلیل میدانی-مداری مدارات فرکانس بالا..... ۳۱۰

۹-۴-۱- استخراج پارامترهای مدار معادل ترانزیستور..... ۳۱۰

۹-۴-۲- روش میدانی-مداری برای تقویت کننده FET ۳۱۶

۹-۴-۳- شبیه سازی میدانی-مداری یک تقویت کننده در باند X ۳۲۱

۹-۵- تحلیل تمام موج یک تقویت کننده در باند فرکانسی Q ۳۲۲

۹-۶- بررسی پایداری تقویت کننده به کمک نتایج حوزه زمان..... ۳۲۶

۹-۶-۱- بررسی مستقیم نتایج حوزه زمان..... ۳۲۶

۹-۶-۲- بررسی پایداری براساس معیار لیاپانوف..... ۳۳۱

۹-۶-۳- بررسی پایداری به کمک تحلیل تمام موج..... ۳۳۴

۹-۶-۴- بررسی پایداری تقویت کننده در روش میدانی-مداری..... ۳۳۷

۹-۷- خلاصه..... ۳۴۰

۹-۸- مراجع..... ۳۴۱

واژه‌نامه..... ۳۴۳

فهرست راهنما..... ۳۴۵

پیش گفتار

فناوری مخابرات و الکترونیک فرکانس بالا در تحقق سیستم‌های باند وسیع و فوق‌العاده وسیع، کاهش حجم و ابعاد سیستم، دسترسی به سرعت و نرخ داده بالا و امنیت مناسب، امروزه نقش وافر و کلیدی در زندگی بشر ایفا نموده است.

علاوه بر نقش سنتی فناوری فوق در کاربردهایی نظیر مخابرات نقطه به نقطه و یا نقطه به چند نقطه، مخابرات ماهواره‌ای، سیستم‌های رادار، مخابرات سیار و کاربردهای صنعتی و پزشکی، از کاربردهای مدرن آن در تحقق سیستم‌های مخابرات سیار نسل سوم و چهارم، سیستم‌های مخابراتی¹ MIMO با نرخ داده بالا (چند گیگا بیت بر ثانیه)، سیستم‌های اینترنت پرسرعت، تحقق سیستم‌های چندرسانه‌ای در باند ۶۰ گیگاهرتز، رادارهای ضد تصادف² در باند موج میلیمتری، سیستم‌های مخابرات بدون سیم³ LMDS و⁴ MMDS و بکارگیری فناوری ترانزیستورهای عمده‌تأ پزشکی، بیولوژی و حفاظتی می‌توان نام برد.

در حال حاضر، به‌منظور بهره‌وری بهینه از امکاناتی که فناوری فرکانس بالا در اختیار قرار می‌دهد، تحقیقات ریشه‌ای در بخش‌های مختلف این فناوری متمرکز شده است. این درحالی است که از نظر دانش فنی (سخت‌افزار و نرم‌افزار) با یک فناوری پرهزینه و البته راهبردی روبرو هستیم و در نظر گرفتن تمهیدات لازم در فرآیند مدلسازی، تحلیل، طراحی و ساخت در سطوح مختلف ادوات، مدارات و سیستم‌ها ضروری است.

ادوات فعالی نظیر ترانزیستورهای⁵ MESFET،⁶ MOSFET،⁷ HEMT⁸ و⁹ HBT در فناوری‌های مختلف¹⁰ GaAs،¹¹ GaN و¹¹ CMOS و در کاربردهای آنالوگ و دیجیتال، در نقش هسته مرکزی این فناوری، قابلیت‌ها و عملکرد مناسب و راهبردی در

¹ Multiple Input Multiple Output

² Anti-collision

³ Local Multipoint Distribution Service

⁴ Multichannel Multipoint Distribution Service

⁵ Metal-Semiconductor Field Effect Transistor

⁶ Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

⁷ High Electron Mobility Transistor

⁸ Heterojunction Bipolar Transistor

⁹ Gallium Arsenide

¹⁰ Gallium Nitride

¹¹ Complementary Metal-Oxide Semiconductor

باندهای فرکانسی مایکروویو، موج میلیمتری و تراهرتز از خود نشان داده‌اند. در این میان نقش ترانزیستور FET از نظر مشخصات الکترونیکی و الکترومغناطیسی نسبت به دیگر ادوات بارزتر و به‌نوعی شاخص است. به‌همین دلیل محتوای این کتاب در فرآیند مدلسازی، تحلیل عملکرد و تسریع روش‌های ارزیابی عملکرد این قطعه در فرکانس بالا متمرکز گردیده است.

با توجه به فرآیند مدلسازی و تحلیل ادوات فرکانس بالا که امروزه مورد توجه قرار می‌گیرد، محتوای کتاب در نه فصل به شرح ذیل تدوین گردیده است:

فصل اول به معرفی روش FDTD به منظور حل عددی معادلات الکترومغناطیسی در حوزه زمان می‌پردازد و شرایط مرزی جذب مورد نیاز و نحوه اعمال منابع در پیاده‌سازی آنرا تشریح می‌نماید. همچنین به نحوه مرتبط کردن معادلات FDTD برای ساختار گسترده و روش E-FDTD پرداخته خواهد شد و بستر لازم جهت مدلسازی و تحلیل ادوات فرکانس مهبیا می‌گردد.

در فصل دوم معادلات خطوط انتقال غیرفعال تزویج شده در دو حالت با تلف و بدون تلف، در حوزه زمان ارایه و روش FDTD برای تحلیل عددی آنها اعمال می‌گردد. از نتایج این بخش در تحلیل‌های فصل‌های آتی، با توجه به ساختار ترانزیستورها، استفاده خواهد شد.

فصل سوم به معادلات خطوط انتقال تزویج شده فعال تلف‌دار و بی‌تلف، در حوزه زمان و حل آنها به روش FDTD، جهت مدلسازی و تحلیل میدانی ترانزیستور، خواهد پرداخت. نحوه گسترده‌سازی معادلات و اعمال شرایط مرزی، تاثیر گسترده بودن سورس در زمین شدن آن و نیز تاثیر محل بارگذاری و تحریک در این فصل بررسی می‌گردد.

تحلیل معادلات حاکم بر ترانزیستور در رژیم غیرخطی به روش FDTD، در فصل چهارم ارایه می‌گردد. تاثیر گسترده بودن سورس، محل بارگذاری، محل تحریک و عناصر پارازیتی در رفتار ترانزیستور در فرکانس‌های بالا نیز بررسی خواهد شد.

در فصل پنجم معادلات مورد نیاز برای تحلیل تمام موج ترانزیستور ارایه و متداول ترین روش حل عددی این معادلات در حوزه زمان (یعنی روش FDTD) تشریح می گردد.

به منظور حل مهمترین مشکل این روش تحلیل، که زمان شبیه سازی بسیار زیاد آن است، دو راهکار در فصل ششم پیشنهاد خواهد شد. راهکار اول، استفاده از تبدیل های موجک در ایجاد شبکه ی غیر یکنواخت و راهکار دوم استفاده از خوش حالت کننده ای به وسیله ی تبدیل های فیلتر بانک است. این روش ها، باعث کاهش چشمگیر حجم ماتریس ها و افزایش سرعت همگایی می گردند.

فصل هفتم به کاربرد روش های مبتنی بر تفاضلات محدود حوزه زمان ضمنی شامل ADI و LOD در تحلیل تمام موج ترانزیستور و ارزیابی کارایی آنها می پردازد. سرعت شبیه سازی بالاتر با حفظ دقت قابل قبول نسبت به روش متداول FDTD، در نتیجه استفاده از گام های زمانی مجاز بزرگتر، در این روش ها مشهود است. از معایب این روش ها افزایش خطای شبیه سازی با افزایش اندازه گام زمانی است.

در جهت کاهش خطای روش های ضمنی مطرح شده، در فصل هشتم روش های بدون مش در حوزه مکان و یا حوزه زمان، در تحلیل تمام موج ترانزیستور بکار گرفته خواهند شد که باعث کاهش حجم محاسبات و زمان شبیه سازی با حفظ دقت می گردند.

با ترکیب مناسب ترین روش های تحلیل میدانی مطرح شده در فصول گذشته، فصل نهم به مدلسازی، طراحی و تحلیل و بررسی پایداری چند نمونه مدار فعال، در فرکانس های کاری مختلف، می پردازد.

لازم می دانیم که از دانشجویان و فارغ التحصیلان دوره ی تحصیلات تکمیلی آزمایشگاه تحقیقاتی مایکروویو/موج میلی متری و مخابرات بدون سیم دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر از جمله آقایان دکتر مسعود موحدی، دکتر کامبیز افروز، مهندس آیدین

تائب و مهندس هانیه علی اکبری که در ارایه نتایج تحقیقاتی بخش‌هایی از کتاب حاضر 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.

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

رشید میرزاوند بروجنی

عضو هیات علمی پژوهشکده فناوری

مخابرات و الکترومغناطیس کاربردی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

rmirzavand@aut.ac.ir

عبدالعلی عبدی‌پور

استاد دانشکده مهندسی برق،

قطب علمی سیستم‌های مخابراتی رادیویی

فرکانس بالا و پژوهشکده فناوری مخابرات

الکترومغناطیس کاربردی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

abdipour@aut.ac.ir