

طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ CMOS

ویرایش دوم

(جلد اول)

نویسنده:

پروفسور: اد رضوی

استاد مهندسی برق

دانشگاه کالیفرنیا، لس آنجلس

مترجمان:

دکتر محمدرضا اشرف، دکتر علی فتاح حصاری

اعضای هیأت علمی دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی شاهرود

سرشناسه	رضوی، بهزاد، ۱۳۴۰ - Razavi, Behzad
عنوان و نام پدیدآور	طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ CMOS / نویسنده بهزاد رضوی؛ مترجمان محمدرضا اشرف، علی فتاح‌حصاری؛ ویراستار علمی عماد ابراهیمی.
مشخصات نشر	شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	۱۲۷۴ ص
شابک	978-964-763791-6
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	عنوان اصلی: [2017], 2nd. ed., Design of analog CMOS integrated circuits
یادداشت	کتاب حاضر با عنوان "طراحی مدارهای CMOS آنالوگ" نیز منتشر شده است.
عنوان دیگر	طراحی مدارهای CMOS آنالوگ
موضوع	مدارهای مجتمع سی. ماس آنالوگ
موضوع	Analog CMOS integrated circuits
موضوع	مدارهای مجتمع خطی - طرح و ساختمان
موضوع	Linear integrated circuits - Design and construction
موضوع	نیمه‌هادی‌های اکسید فلزی مکمل
موضوع	Metal oxide semiconductors, Complementary
شناسه افزوده	اشرف، محمدرضا، ۱۳۶۵ - مترجم
شناسه افزوده	فتاح‌حصاری، علی، ۱۳۶۲ - مترجم
شناسه افزوده	ابراهیمی، عماد، ۱۳۶۳ - ویراستار
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی شاهرود
شناسه افزوده	Shahrood University
رده‌بندی کنگره	TK ۱۷۴
رده‌بندی دیویی	۶۲۱/۳۸۱۵
شماره کتابشناسی ملی	۶۰۰۴۶۵



انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود

عنوان: طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ CMOS (جلد اول)

مؤلف: بهزاد رضوی

مترجمان: محمدرضا اشرف، علی فتاح‌حصاری

ویراستار علمی: عماد ابراهیمی

ویراستار ادبی: خانم صدیقه غلامیان

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ و نوبت چاپ: ۱۳۹۸ - اول

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

بها: ۱۰۰۰۰۰ تومان

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۷۶۳۷-۹۱-۶

چاپ و صحافی: چاپ دیجیتال طوس

نشانی و تلفن: شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه صنعتی شاهرود؛ ۰۲۳-۳۲۳۰۰۳۳۱

فروش آنلاین کتاب: <https://shahroodut.ac.ir/fa/book/>

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

پیش‌گفتار نویسندگان در ویرایش دوم

مانی که پیشنهادهای خود را برای چاپ اول کتاب به ناشرین ارسال کردم، آن‌ها دو سوال برایم مطرح کردند: (۱) در دنیای دیجیتال آینده چه تقاضایی برای کتاب‌های آنالوگ وجود دارد؟ (۲) آیا چاپ کتابی منحصرأ در مورد CMOS منطقی است؟ کلمات «آنالوگ» و «CMOS» در عنوان کتاب، هر دو مورد سؤال قرار گرفتند.

خوشبختانه کتاب مورد استقبال دانشجویان، مربیان و مهندسان قرار گرفت. صدها دانشگاه در جهان، کتاب را به عنوان مرجع مورد استفاده قرار داده، به پنج زبان ترجمه کرده و ۶۵۰۰ بار به آن ارجاع داده‌اند.

درحالی‌که بسیاری از اصول طراحی آنالوگ نسبت به ویرایش اول تغییری نکرده‌اند، چند دلیل باعث ارائه ویرایش دوم کتاب شد: کوچک‌تر شدن ابعاد و کاهش ولتاژ تغذیه در فن‌آوری CMOS، روش‌های جدید تحلیل و طراحی و نیاز به بیان جزئی‌تر تعدادی از سرفصل‌ها. این ویرایش موارد زیر را دربرمی‌گیرد:

تأکید بیشتر روی فن‌آوری CMOS مدرن، به‌طور خاص به عنوان یک فصل جدید (فصل ۱۱) که پیرامون آشنایی با روش‌های طراحی و طراحی گام به گام آپ‌آمپ در فن‌آوری‌های نانومتری است. این ویرایش شامل موارد زیر است:

- مطالعه گسترده فیدبک به روش‌های بُد و میدل‌بروک.
- بخشی جدید شامل تحلیل پایداری با استفاده از روش نایکوئیست؛ از آن‌جایی‌که روش پرکاربرد بُد در بعضی ساختارهای رایج پاسخگو نیست.
- مطالعه FinFET‌ها.
- ذکر نکات برجسته و مهم در طراحی نانومتری به‌صورت ستون‌هایی در متن.
- بخشی جدید در مورد روش‌های بایاس‌کردن.
- مطالعه مدارهای بندگپ ولتاژ-پایین.

• بیش از ۱۰۰ مثال جدید.

تعدادی از مدرسان می‌پرسند که چرا با افزارهای مرتبه دوم شروع می‌کنیم. این کار دو دلیل دارد: (۱) این مسیر به‌عنوان یک نقطه شروع به حساب می‌آید و دید ارزشمندی در تحلیل تقویت‌کننده‌ها درخصوص دامنه نوسان مجاز ولتاژ فراهم می‌کند (۲) FinFET ها (افزارهایی که در ابعاد ۱۶ نانومتر و کوچک‌تر استفاده می‌شوند) با وجود داشتن طول کانال‌های کوتاه، مشخصه‌ای تقریباً مرتبه دومی از خود نشان می‌دهند. این کتاب همراه با حل تمرین‌ها و یک سری جدید از اسلایدهای پاورپوینت که در آدرس www.mhhe.com/raza در دسترس قرار گرفته، ارائه شده است.

بهزاد رضوی

جولای ۲۰۱۵

پیش‌گفتار نویسنده در ویرایش اول

در دو دهه گذشته کاربرد فن‌آوری CMOS در مدارهای مجتمع آنالوگ، با کاهش هزینه، بهبود عملکرد و کاربرد روزافزون در صنعت، به سرعت گسترش پیدا کرده است؛ درحالی‌که ترانزیستورهای دوقطبی سیلیکنی و افزارهای III-V، کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند، فن‌آوری CMOS تنها انتخاب مناسب برای مجتمع‌سازی سامانه‌های سیگنال‌مخلوط پیچیده امروزی است. با کاهش طول کانال که تراز ۵۰ نانومتر، فن‌آوری CMOS هم‌چنان در طراحی مدار برای دو دهه دیگر، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. طراحی مدار آنالوگ نیز همراه با فن‌آوری، تکامل پیدا کرده است. مدارهای آنالوگ ولتاژ-بالا، توان-بالا که شامل چندده ترانزیستور بوده و سیگنال‌های کوچک و پیوسته در زمان را تحلیل می‌کردند، به تدریج با سامانه‌های ولتاژ-پایین، توان-پایین، شامل هزاران ترانزیستور جایگزین شده‌اند که سیگنال‌های بزرگ و عموماً گسسته در زمان را تحلیل می‌کنند. برای مثال، چندین روش آنالوگ که فقط ده سال پیش استفاده می‌شدند، به دلیل تطابق نیافتن با عملکرد ولتاژ-پایین، کنار گذاشته شده‌اند.

این کتاب با تأکید بر مبانی، در کنار روش‌های جدیدی که دانشجویان و مهندسان برای داشتن تخصص کار در صنعت نیاز دارند، به تحلیل و طراحی مدارهای مجتمع CMOS آنالوگ می‌پردازد. از آنجایی که طراحی آنالوگ نیاز به دقت و پشتکار دارد، هر

مفهوم ابتدا به صورت شهودی ارائه شده و سپس با تحلیل دقیق اثبات می شود. هدف ایجاد مفاهیم پایه و ثابت در کنار روش های تحلیل مدارها است تا خواننده بیاموزد که چه تقریب هایی در چه مدارهایی قابل استفاده و چه مقدار خطا از هر تقریب قابل انتظار است؛ هم چنین این رویکرد به خواننده این امکان را می دهد تا مفاهیم را با اندک تلاش بیشتر برای مدارهای دوقطبی نیز به کار برد.

اکثر مطالب این کتاب را هم در دانشگاه UCLA و هم در صنعت تدریس کرده و بر اساس پیشنهادهای دریافتی، ترتیب، ساختار و محتوای آن را اصلاح کردم. همان طور که خواننده در این کتاب مشاهده خواهد کرد، چهار «قانون طلایی» را در نوشتار (و تدریس) دنبال می کنم. (۱) توضیح می دهم که چرا خواننده نیاز به دانستن مفهومی دارد که قرار است به آن دست یابد. (۲) خودم را به جای خواننده می گذارم و سؤالاتی را پیش بینی می کنم که ممکن است در اول مطالعه برایش ایجاد شود؛ (۳) با در نظر داشتن قانون ۲، وانمود می کنم که دانسته ایم تا چه اندازه خواننده (در مطالعه اول) بوده و تلاش می کنم تا با او «جلو رفته» و در نتیجه مسیر فکری مشابهی را تجربه نمایم؛ (۴) از مفهوم «پایه» به زبان ساده (حتی غیردقیق) شروع می کنم و به تدریج اصلاحات مورد نیاز را اضافه می کنم تا به نتیجه (دقیق) نهایی برسیم. قانون آخر به طرز خاص در تدریس مدارها اهمیت دارد، چون به خواننده این امکان را می دهد تا تکالیف ساختار آنها را مشاهده کرده، در نتیجه هم تحلیل و هم ترکیب آنها را بیاموزد.

این کتاب شامل ۱۶ فصل است که محتوا و ترتیب آنها به دقت انتخاب شده تا سیری طبیعی هم برای مطالعه شخصی و هم برای تدریس در دوره های آموزشی ترمی یا سه ماهه داشته باشد. برخلاف چند کتاب دیگر در زمینه طراحی آنالوگ، در ابتدا مطالعه ای حداقلی در مورد فیزیک ترانزیستور MOS انجام شده و ویژگی های پیشرفته تر و جزئیات فرایند ساخت را در فصل های بعدی بررسی می کنیم. برای یک فرد متخصص، ممکن است مطالعه مقدماتی فیزیک ترانزیستور بیش از حد ساده به نظر برسد، اما تجربه من نشان می دهد که (الف) خوانندگان در اولین مرتبه مطالعه کتاب، پیش از آشنایی با مدارها، جذب اثرهای مرتبه بالا و فن آوری ساخت آنها نمی شوند، چون ارتباط بین آنها را درک نمی کنند؛ (ب) حتی تحلیل ساده نیز اگر به خوبی بیان شده باشد، به طور قابل توجهی برای پوشش مدارهای پایه کافی است؛ (ج) خوانندگان، مفاهیم پیشرفته فیزیک ترانزیستور

و مراحل ساخت آن را با آمادگی بسیار بیشتری، پس از آشنایی مفصل با تحلیل و طراحی انواع مدار، فرا خواهند گرفت.

فصل ۱ انگیزه یادگیری مطالب این کتاب را به خواننده می‌دهد. فصل ۲ فیزیک و عملکرد پایه ترانزیستورهای MOS را بیان می‌کند.

فصل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب با بررسی تقویت‌کننده‌های تک‌طبقه، تقویت‌کننده‌های تفاضلی و آینه‌های جریان، روش‌های تحلیل کارآمدی را برای کمی‌سازی عملکرد مدارهای ساده، حاصل می‌کند.

فصل‌های ۶ و ۷ دو نقص مدارها شامل، پاسخ فرکانسی و نویز را مطرح می‌کنند. نویز در مراحل ابتدایی بررسی می‌شود تا زمانی که خواننده اثر آن را در مدارهای پیشرفته بعدی در نظر می‌گیرد. مطالب کاملاً جا افتاده باشد.

فصل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب به بررسی و توصیف فیدبک، تقویت‌کننده‌های عملیاتی، و پایداری در سیستم‌های فیدبک می‌پردازد. با استفاده از ویژگی‌های تحلیل‌شده فیدبک، خواننده ترغیب می‌شود تا آپ‌ها، پایدار و با عملکرد مناسب را طراحی کرده و مصالحه‌های بین سرعت، دقت و توان مصرفی را درک نماید.

فصل‌های ۱۱ تا ۱۳ به بررسی مطالب پیشرفته‌تری می‌پردازد: مرجع‌های بندگپ، مدارهای کلیدزنی-خازنی ساده و اثر غیرخطی بودن و غیره. تطبیق این سه موضوع به دلیل اهمیت داشتن در بیشتر سامانه‌های آنالوگ و سیگنال-معالی امروز، در این جا بررسی شده‌اند.

فصل ۱۴ شامل اثرات ترانزیستور MOS مرتبه-بالا و مدل‌های آن، با تأکید بر مفاهیم طراحی مدار است. ترجیحاً، این فصل می‌تواند در ادامه فصل ۲ نیز در نظر گرفته شود. فصل ۱۵ فن‌آوری ساخت CMOS را با مروری مختصر بر قوانین طراحی جانمایی بیان می‌کند.

فصل ۱۶ به توضیح جانمایی و بسته‌بندی مدارهای سیگنال-مخلوط و آنالوگ می‌پردازد. چندین نکته کاربردی که عملکرد مدار را تحت تأثیر قرار می‌دهند، توصیف شده و روش‌های مختلفی ارائه شده است.

فرض بر این است که خواننده دانش اولیه‌ای از مدارها و افزاره‌های الکترونیکی را مانند پیوندهای $p-n$ ، مفهوم عملکرد سیگنال-کوچک، مدارهای معادل و بایاس کردن ساده

دارد. به عنوان یک درس اختیاری در سطح کارشناسی، فصل‌های ۱ تا ۸ طی سه ماه و فصل‌های ۱ تا ۱۰ در یک ترم قابل ارائه است. در قالب یک درس کارشناسی ارشد در سال اول، فصل‌های ۱ تا ۱۱ به همراه یکی از فصل‌های ۱۲، ۱۳ یا ۱۴ در سه ماه و کل کتاب در یک ترم می‌تواند تدریس شود.

تمرین‌های انتهایی هر فصل به گونه‌ای طراحی شده‌اند که درک خواننده را از مطلب مربوطه افزایش داده و با در نظر گرفتن ملاحظات عملی اضافی، کامل نماید. حل تمرین کتاب نیز برای مرییان در دسترس خواهد بود.

بهزاد رضوی

جولای ۲۰۰۰

تقدیر و تشکر و تبریک برای ویرایش دوم

ویرایش دوم با اشتیاق فراوان توسط تعداد زیادی از افراد در دانشگاه و صنعت، مرور و بررسی شده است. باعث افتخار من است که از مشارکت آن‌ها تشکر نمایم:

Saheed Adeolu Tijani (University of Iowa)
 Firooz Aflatouni (University of Pennsylvania)
 Pietro Andreani (Lund University)
 Emily Allstot (University of Washington)
 Tejasvi Anand (University of Illinois, Urbana-Champaign)
 Afshin Babveyh (Stanford)
 Nima Baniasadi (UC Berkeley)
 Sun Yong Cho (Seoul National University)
 Min Sung Chu (Seoul National University)
 Yi-Ying Cheng (UCLA)
 Jeny Chu (UCLA)
 Milad Darvishi (Qualcomm)
 Luis Fei (Intel)
 Andrea Ghilioni (University of Pavia)
 Chengkai Gu (UCLA)
 Payam Heydari (UC Irvine)
 Cheng-En Hsieh (National Taiwan University)
 Po-Chiun Huang (National Tsing-Hua University)
 Deog-Kyoon Jeong (Seoul National University)
 Nader Kalantari (Broadcom)
 Alireza Karimi (UC Irvine)
 Ehsan Kargar (University of Pavia)