

الکترونیک دیجیتال

علی جهانیان

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی
۴۹۹



الکترونیک دیجیتال

علی جهانبان

ویراسته معصومه طوفان پور

حروفچین و صفحه ارا: سمیرا دهقان

ناظر چاپ: صفر ممیزاد

شمارگان: ۲۰۰۰

قیمت: ۱۲۰۰۰۰ ریال

ناشر: مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

کلیه حقوق تا پنج سال برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

جهانبان، علی ۱۳۵۳

الکترونیک دیجیتال / مؤلف علی جهانبان - تهران: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و

انتشارات، ۱۳۹۱.

چهارده، ۳۴۷ ص - (انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۴۹۹).

ISBN: 9789644572422

کتابنامه.

واژه‌نامه.

۱. الکترونیک رقمی. ۲. مدارهای مجتمع رقمی - طرح و ساختمان. ۳. مدارهای برقی -

تجزیه و تحلیل. الف: دانشگاه شهید بهشتی، مرکز چاپ و انتشارات. ب: عنوان.

۶۲۱

TK ۷۸۶۸ ۷ الف ۶ ج ۱۳۹۲

۲۸۱۵

الف ۹۵۸ ج

۱۳۹۲

کتابخانه مرکزی و مرکز اسناد دانشگاه شهید بهشتی

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.sbu.ac.ir

فهرست مطالب

سخن آغازین	سیزده
۱. صنعت طراحی دیجیتال	۱
۱.۱. دنیای دیجیتال	۱
۲.۱. تاریخچه‌ی طراحی دیجیتال	۳
۱.۲.۱. منطق دودویی، گشایش افقی نو	۳
۲.۲.۱. لامپ خلأ، گام نخست در پیاده‌سازی منطق	۴
۳.۲.۱. ترانزیستور، ابزار تجاری‌سازی منطق	۶
۴.۲.۱. مدار مجتمع، ورود به دنیای میکرومتری	۸
۳.۱. روند رشد طراحی دیجیتال برپایه‌ی ادوات نیمه‌هادی	۱۵
۱.۳.۱. قانون مور	۱۵
۲.۳.۱. روند رشد فرکانس مدارهای مجتمع	۱۶
۳.۳.۱. روند کوچک شدن ابعاد فناوری ساخت	۱۷
۴.۳.۱. روند افزایش توان مصرفی	۱۹
۴.۱. طراحی خودکار مدارهای مجتمع پرتراکم	۲۰
۱.۴.۱. طراحی سطح سیستمی و رفتاری	۲۰
۲.۴.۱. طراحی سطح منطقی	۲۱
۳.۴.۱. طراحی سطح فیزیکی	۲۲
۵.۱. سبک‌های طراحی چینش سخت‌افزار	۲۲
۶.۱. مثالی از طراحی خودکار یک سیستم دیجیتال	۲۵
۷.۱. تمرین‌ها	۳۰
۸.۱. مراجع	۳۱
۹.۱. برای بررسی بیشتر	۳۱
۲. فرآیند ساخت مدارهای مجتمع	۳۳
۱.۲. مقدمه	۳۳
۲.۲. نحوه‌ی نمایش ساختار مدار مجتمع	۳۴
۳.۲. مراحل ساخت تراشه	۳۵
۳.۲.۱. آماده‌سازی بستره	۳۷

۳۹.....	۲.۳.۲. فرآیند ساخت ترانزیستورها
۴۷.....	۳.۳.۲. برقراری اتصالات فلزی
۴۹.....	۴.۳.۲. بسته‌بندی تراشه
۵۱.....	۵.۳.۲. قواعد طراحی
۵۲.....	۴.۲. مراجع
۵۲.....	۵.۲. برای بررسی بیشتر
۵۳.....	۳. زبان‌های توصیف سطح سویچ
۵۴.....	۱.۳. مقدمه
۵۴.....	۲.۳. زبان‌های سطح سویچ و زبان‌های سطح ترانزیستور
۵۵.....	۳.۳. زبان SPICE
۵۶.....	۱.۳.۲. توصیف اجزا و ساختار مدار در زبان SPICE
۶۹.....	۲.۳.۲. جملات کنترلی برای تعیین نوع تحلیل
۷۰.....	۴.۳. آشنایی با زیرمجموعه‌ی سطح سویچ زبان VERILOG
۷۱.....	۱.۴.۲. عناصر سطح سویچ
۷۳.....	۲.۴.۲. سویچ پایه
۷۴.....	۳.۴.۲. دروازه‌های CMOS
۷۶.....	۴.۴.۲. منطق دروازه‌ی عبور (یک MUX دو به یک)
۷۸.....	۵.۴.۲. عناصر حافظه در سطح سویچ
۷۹.....	۶.۴.۲. مدل‌سازی توانایی سیگنال‌ها
۸۲.....	۵.۳. تمرین‌ها
۸۴.....	۶.۳. مراجع
۸۵.....	۴. ادوات نیمه‌هادی
۸۵.....	۱.۴. مقدمه
۸۶.....	۲.۴. نیمه‌هادی‌های نوع N و P
۸۹.....	۳.۴. دیود PN
۹۲.....	۱.۳.۴. دیود در حالت بایاس معکوس
۹۶.....	۲.۳.۴. خازن اتصال در حالت سیگنال بزرگ
۹۹.....	۳.۳.۴. دیود در حالت بایاس مستقیم
۱۰۰.....	۴.۳.۴. خازن اتصال در یک دیود با بایاس مستقیم
۱۰۱.....	۵.۳.۴. زمان بازیابی معکوس

۱۰۲.....	۳.۴ دیودهای شاتکی
۱۰۳.....	۴.۴ ترانزیستورهای MOS
۱۰۶.....	۴.۴.۱ نمادهای مورد استفاده برای ترانزیستورهای MOS
۱۰۷.....	۴.۴.۲ نواحی کاری ترانزیستورهای MOS
۱۱۶.....	۴.۴.۳ روابط مرتبه اول برای ترانزیستورهای کانال p
۱۱۷.....	۴.۴.۴ بهره‌ی ترانزیستور MOS
۱۲۱.....	۴.۴.۵ خازن‌های ترانزیستور MOS
۱۲۲.....	۴.۴.۶ اثرات مرتبه دوم
۱۳۲.....	۵.۴ ترانزیستورهای دوقطبی
۱۳۳.....	۴.۵.۱ ساختار ترانزیستورهای دوقطبی
۱۳۵.....	۴.۵.۲ کارکرد ترانزیستورهای دوقطبی
۱۳۶.....	۴.۵.۳ مشخصه‌ی جریان - ولتاژ ترانزیستورهای دوقطبی
۱۳۸.....	۴.۶ مدل SPICE اجزای نیمه‌هادی
۱۳۹.....	۴.۶.۱ پارامترهای مدل ترانزیستور MOS
۱۳۹.....	۴.۶.۲ پارامترهای دیود در SPICE
۱۴۰.....	۴.۶.۳ پارامترهای مدل ترانزیستور دوقطبی
۱۴۱.....	۴.۷ تمرین‌ها
۱۴۵.....	۴.۸ مراجع
۱۴۶.....	۴.۹ برای بررسی بیشتر
۱۴۷.....	۵. طراحی منطق با فناوری MOS
۱۴۷.....	۵.۱ مقدمه
۱۴۸.....	۵.۲ مفاهیم پایه در الکترونیک دیجیتال
۱۴۸.....	۵.۲.۱ منحنی مشخصه
۱۵۰.....	۵.۲.۲ حاشیه‌ی نویز
۱۵۲.....	۵.۲.۳ تأخیر
۱۵۴.....	۵.۲.۴ توان مصرفی
۱۵۹.....	۵.۳ منطق NMOS
۱۶۶.....	۵.۴ منطق شبه NMOS
۱۶۷.....	۵.۴.۱ وارون‌گر شبه NMOS با بار تخلیه‌ای
۱۷۱.....	۵.۴.۲ وارون‌گر شبه NMOS با بار اشباع
۱۷۵.....	۵.۴.۳ وارون‌گر شبه NMOS با بار اشباع کانال p

۱۷۹.....	۵. ۴. ۴. توان مصرفی
۱۸۰.....	۵. ۴. ۵. تأخیر فراز
۱۸۰.....	۵. ۴. ۶. زمان فرود
۱۸۳.....	۵. منطق CMOS
۱۸۳.....	۵. ۵. ۱. وارونگر CMOS
۱۹۱.....	۵. ۵. ۲. تأثیر اندازه‌ی ترانزیستورها بر تأخیر دروازه‌های CMOS
۱۹۵.....	۵. ۶. اشمیت‌تریگر در دروازه‌های منطقی
۱۹۶.....	۵. ۶. ۱. پیاده‌سازی اشمیت‌تریگر با منطق CMOS
۱۹۷.....	۵. ۷. تمرین‌ها
۲۰۳.....	۵. ۸. مراجع
۲۰۴.....	۵. ۹. برای بررسی بیشتر
۲۰۵.....	۶. طراحی زیرسیستم‌های منطقی با فناوری MOS
۲۰۵.....	۶. ۱. مقدمه
۲۰۵.....	۶. ۲. طراحی دروازه‌های منطقی شبه NMOS
۲۰۷.....	۶. ۲. ۱. معادل ترانزیستوری یک شبکه‌ی ترانزیستوری
۲۱۱.....	۶. ۲. ۲. معادل مقاومتی یک شبکه‌ی ترانزیستوری
۲۱۲.....	۶. ۲. ۳. ارزیابی تابع منطقی یک دروازه‌ی شبه NMOS
۲۱۴.....	۶. ۲. ۴. عینیت بخشیدن به دروازه‌های شبه NMOS پیچیده
۲۱۷.....	۶. ۲. ۵. انتخاب اندازه‌ی ترانزیستورها
۲۱۹.....	۶. ۳. طراحی دروازه‌های CMOS
۲۲۰.....	۶. ۳. ۱. طراحی CMOS رایج
۲۲۶.....	۶. ۴. طراحی منطق با دروازه‌های عبور
۲۳۰.....	۶. ۵. افت ولتاژ روی دروازه‌های عبور با کانال N
۲۳۵.....	۶. ۶. مقایسه‌ی ترانزیستورهای عبور کانال N یا دروازه‌ی عبور CMOS
۲۳۶.....	۶. ۷. منطق دروازه عبور با کانال N با نوسان کامل
۲۳۷.....	۶. ۸. جریان‌های نشتی
۲۳۸.....	۶. ۹. مدارهای CMOS تفاضلی
۲۴۱.....	۶. ۱۰. تمرین‌ها
۲۵۱.....	۶. ۱۱. مراجع
۲۵۱.....	۶. ۱۲. برای بررسی بیشتر
۲۵۳.....	۷. طراحی دروازه‌های CMOS پویا

۲۵۳	۱. مقدمه
۲۵۶	۲. منطق CMOS دومینو
۲۵۹	۳. منطق دومینو بدون وارونگر
۲۶۰	۴. منطق دومینوی ایستا
۲۶۱	۵. انتشار بار در دروازه‌های منطق دومینو
۲۶۳	۶. مدارهای منطق دومینوی چندخروجی
۲۶۴	۷. منطق بدون رقابت
۲۶۷	۸. منطق دومینوی تفاضلی
۲۶۸	۹. منطق NORA تفاضلی
۲۷۰	۱۰. تمرین‌ها
۲۷۳	۱۱. مراجع
۲۷۳	۱۲. برای بررسی بیشتر
۲۷۵	۸. لچ‌ها و فلیپ فلاپ‌ها
۲۷۵	۱. لچ‌های CMOS
۲۸۳	۲. سلول حافظه‌ی ایستا با دسترسی تصادفی
۲۸۵	۳. لچ‌های CMOS پویا
۲۸۶	۴. فلیپ فلاپ‌ها
۲۸۸	۵. دروازه‌ی D-FF
۲۸۸	۶. دروازه‌ی SR-FF
۲۸۹	۷. دروازه‌ی JK-FF
۲۹۰	۸. دروازه‌ی T-FF
۲۹۰	۹. دروازه‌ی فلیپ فلاپ CMOS
۲۹۳	۱۰. تمرین‌ها
۲۹۳	۱۱. مراجع
۲۹۳	۱۲. برای بررسی بیشتر
۲۹۵	۹. طراحی دیجیتال با ترانزیستورهای دو قطبی
۲۹۵	۱. مقدمه
۲۹۶	۲. منطق مقاومت-ترانزیستور
۲۹۸	۱. طراحی دروازه‌های منطقی با منطق مقاومت-ترانزیستور
۲۹۹	۳. منطق دیود-ترانزیستور

۳۰۱.....	۴.۹ منطق ترانزیستور-ترانزیستور
۳۰۲.....	۱.۴.۹ طراحی دروازه‌های دیجیتال با منطق ترانزیستور-ترانزیستور
۳۰۵.....	۵.۹ منطق امیتر مزدوج
۳۰۶.....	۱.۵.۹ زوج تفاضلی امیتر مزدوج
۳۰۷.....	۲.۵.۹ طراحی دروازه‌های دیجیتال با منطق امیتر مزدوج
۳۱۰.....	۶.۹ BiCMOS
۳۱۰.....	۱.۶.۹ طراحی دروازه‌های منطقی با فناوری BiCMOS
۳۱۴.....	۷.۹ تمرین‌ها
۳۱۷.....	۸.۹ مراجع
۳۱۷.....	۹.۹ برای بررسی بیشتر
۳۱۹.....	۱۰.۱ رویکردهای نوین در صنعت دیجیتال
۳۱۹.....	۱.۱.۱۰ مقدمه
۳۱۹.....	۱.۱.۱۰ کاهش بارآوری ساخت
۳۲۰.....	۲.۱.۱۰ کاهش قابلیت اطمینان تراشه
۳۲۱.....	۳.۱.۱۰ افزایش هزینه‌ی ساخت
۳۲۱.....	۲.۱۰ رویکردهای نوین در فناوری MOS
۳۲۲.....	۳.۱۰ فناوری‌های پس از قانون مور
۳۲۲.....	۱.۳.۱۰ نانو لوله‌ی کربنی
۳۲۵.....	۲.۳.۱۰ الکترونیک مولکولی
۳۲۸.....	۳.۳.۱۰ پردازش کوانتومی
۳۲۹.....	۴.۳.۱۰ آتاماتای سلولی کوانتومی
۳۳۲.....	۴.۱۰ ترانزیستور تک الکترونی
۳۳۴.....	۵.۱۰ مراجع
۳۳۵.....	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی
۳۳۹.....	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی
۳۴۳.....	نمایه

سخن آغازین

قرن بیستم، با نوآوری‌های شگفت‌انگیزی در عرصه‌ی دانش بشری همراه بود. یکی از این موارد، ابداع فناوری مدارهای مجتمع نیمه‌هادی بود که به خلق رایانه‌ها و ادوات ارتباطی و خانگی دیجیتال منجر شد و به تدریج رویکردی جدید در صنعت و زندگی انسان‌ها ایجاد نمود. صنعت دیجیتال امروزه به بخشی از زندگی روزمره‌ی انسان‌ها تبدیل شده است و آگاهی اجمالی از ادوات دیجیتال حتی برای کاربردهای عادی زندگی ضروری می‌نماید.

الکترونیک دیجیتال به عنوان یکی از درس‌های تخصصی رشته‌ی مهندسی کامپیوتر (گرایش سخت‌افزار) از اهمیت خاصی برخوردار است. اغلب زمینه‌های تخصصی این رشته مانند طراحی مدارهای مجتمع، طراحی سامانه‌های نهفته، معماری سامانه‌های کامپیوتری و ... بر پایه‌ی اطلاعات و روش‌هایی بنا نهاده شده است که در این درس بیان می‌شوند. با توجه به اهمیت خاص این درس، وجود منابع درسی کامل و به‌روز برای آن، از اهمیت خاصی برخوردار است. از سوی دیگر، تفکیک دو درس الکترونیک دیجیتال و طراحی مدارهای مجتمع پرتراکم در کشور سبب شده که منابع درسی خارجی موجود، به طور مشخص برای درس الکترونیک دیجیتال قابل استفاده نباشند. چندین کتاب با ارزش در این زمینه در کشور تألیف شده است که تا به حال مورد استفاده‌ی دانشجویان بوده‌اند، اما با توجه به رشد سریع صنعت دیجیتال، نیاز به ایجاد کتابی جدیدتر با نگرش به فناوری‌های روز برای رشد دانش دانشجویان ضروری به نظر می‌رسد.

این کتاب برای استفاده‌ی دانشجویان مهندسی کامپیوتر و نیز مهندسان دیجیتال طراحی شده و هدف اصلی از تألیف آن، ایجاد یک منبع با بار تئوری خوب به همراه اطلاعات فنی مناسب است که هم نیازهای درسی دانشجویان و هم نیازهای فنی مهندسان دیجیتال را برآورد. رویکردهایی که مؤلف کتاب در نظر داشته، عبارت‌اند از:

- با توجه به نیاز وافر دانشجویان به وجود منبع کامل و به‌روز در این زمینه، سعی شده که کتاب تألیف شده مطابق بر سرفصل‌های جدید مصوب برای درس الکترونیک دیجیتال در کنار انطباق با فناوری‌های نوین و پر مصرف صنعت دیجیتال در سطح جهان باشد ■

- ایجاد دانش و جسارت طراحی دو هدف اصلی این اثر است. بر این اساس، مباحث تئوری مورد نیاز برای طراحی دیجیتال با عمق مناسب تبیین شده؛ در کنار مباحث تئوری عمیق، نکات فنی و تجربی مورد نیاز به همراه مثال‌های مناسب ارائه شده است که به دانشجویان و مهندسان در فهم مطالب و آزمایش روش‌های ارائه شده کمک می‌کند.
 - روش‌های طراحی سامانه‌های دیجیتال کاملاً مبتنی بر استفاده از ابزارهای طراحی خودکار است. در جای جای کتاب لزوم مهارت بر ابزارهای طراحی گوشزد شده و یک فصل کتاب به آموزش مقدماتی زبان‌ها و ابزارهای طراحی دیجیتال سطح سوییچ و ترانزیستور اختصاص یافته تا دانشجویان و مهندسان مهارت کافی در استفاده از ابزارها را بیابند.
 - با توجه به تغییر روز به روز این صنعت، یک فصل کتاب به بیان موجز مشکلات فناوری‌های کنونی و فناوری‌های مدرن دیجیتال اختصاص یافته که دید مناسبی نسبت به آینده‌ی این صنعت برای دانشجویان و محققان ایجاد می‌نماید.
- از همکار عزیزم جناب آقای دکتر مجید محمدی که در تألیف و تدوین بخش‌هایی از فصل ۳ و ۱۰ کمک فکری و عملی شایانی نموده‌اند، کمال تشکر را دارم و از همکاری دانشجویان در رفع اشکال‌های متن قدردانی می‌نمایم. بابت تمام ساعت‌هایی که به خاطر کار روی این کتاب از خانواده‌ام دریغ کرده‌ام، از ایشان پوزش می‌طلبم و در پایان از خداوند متان تشکر می‌کنم که شرایط ادای زکات دانشم را - هر چند ناچیز است - به بنده عطا فرمود.

علی جهانیان
۱۳۹۱