

## ادوات نیمه هادی

www.ketab.ir

تالیف علیرضا صالحی

استاد گروه الکترونیک

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی



شماره ۳۴۴

سرشناسه: صالحی، علیرضا، ۱۳۳۵ -  
عنوان و نام پدیدآور: ادوات نیمه‌هادی / تالیف علیرضا صالحی.  
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۲.  
مشخصات ظاهری: iii، ۳۶۹ ص.  
شابک: 978-600-6383-58-3  
وضعیت فهرست نویسی: فیبا  
یادداشت پشت جلد به انگلیسی: Alireza Salehi.Semiconductor devices.  
یادداشت: کتابنامه: ص. [۳۵۱] - ۳۶۰..  
یادداشت: نمایه.  
موضوع: نیمه‌هادی‌ها  
رده بندی کنگر: ۳۹۲-۲۳ الف ۲۳ ص/TK۷۸۷۱/۸۵  
رده بندی دیویی: ۶۲۱.۳۸۱۵۲  
شماره کتابشناسی ملی: ۳۳۱ ۸۴۲

<http://press.kntu.ac.ir>



ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

عنوان: ادوات نیمه‌هادی  
مؤلف: دکتر علیرضا صالحی  
ویرایش: دوم  
نوبت چاپ: دوم  
تاریخ انتشار: اسفند ۱۳۹۶، تهران  
شمارگان: ۵۰۰ نسخه  
چاپ: پدیدرنگ  
صحافی: گرنامی  
قیمت: ۳۰۰۰۰ تومان

(تمام حقوق برای ناشر محفوظ است)

خیابان میرداماد غربی - پلاک ۴۷۰ - انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲  
میدان ونک - خیابان ولی عصر (عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - پلاک ۲۶۲۶ - مرکز پخش و فروش انتشارات  
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: [press@kntu.ac.ir](mailto:press@kntu.ac.ir) - تارنما (فروش آنلاین): [www.press.kntu.ac.ir](http://www.press.kntu.ac.ir)

|   |                  |
|---|------------------|
| ۱ | پیشگفتار چاپ اول |
| ۳ | پیشگفتار چاپ دوم |
| ۵ | مقدمه            |

## فصل اول

|    |                          |
|----|--------------------------|
| ۹  | ۱- مبانی فیزیک حالت جامد |
| ۹  | ۱-۱ ساختمان بلوری        |
| ۱۳ | ۲- ساختار حالت جامد      |
| ۱۵ | ۳- باند انرژی            |

## فصل دوم

|    |                                               |
|----|-----------------------------------------------|
| ۲۱ | ۲- پیوند های $p-n$                            |
| ۲۱ | ۱-۲ پیوند $p-n$ در شرایط بدون بایاس           |
| ۲۶ | ۲-۲ مشخصه جریان - ولتاژ در یک پیوند $p-n$     |
| ۲۹ | ۳-۲ سد پتانسیل و اثرات بایاس در پیوند $p-n$   |
| ۳۱ | ۴-۲ مشخصه های جریان - ولتاژ در یک پیوند واقعی |
| ۳۴ | ۵-۲ عرض ناحیه تخلیه                           |
| ۳۷ | ۶-۲ خازن لایه تخلیه                           |
| ۴۰ | ۷-۲ جریان اشباع معکوس در دیود                 |

## فصل سوم

|    |                                                     |
|----|-----------------------------------------------------|
| ۴۵ | ۳- پیوند های تونلی و مکانیسم تونل زنی               |
| ۴۵ | ۱-۳ مقدمه                                           |
| ۴۷ | ۲-۳ نمودار جریان - ولتاژ دیود تونلی                 |
| ۵۲ | ۳-۳ ترانزیستور ها و دیودهای تشدید تونلی (RTD و RTT) |
| ۵۵ | ۱-۳-۳ دیود های تشدید تونلی                          |
| ۵۷ | ۲-۳-۳ ترانزیستورهای تشدید تونلی                     |

## فصل چهارم

|    |                   |
|----|-------------------|
| ۶۹ | ۴- پیوندهای شاتکی |
|----|-------------------|

- ۶۹ ۱-۴ مقدمه
- ۷۱ ۲-۴ اتصال اهمی و شاتکی
- ۷۸ ۳-۴ لایه تخلیه و خازن لایه تخلیه
- ۸۰ ۴-۴ بررسی مدل های مختلف حرکت الکترون در یک دیود شاتکی
- ۸۰ ۱-۴-۴ مدل گسیل گرما یونی
- ۸۳ ۲-۴-۴ مدل های گسیل گرما یونی-نفوذی و گسیل نفوذی
- ۸۷ ۵-۴ اثر حرارت در پیوند های شاتکی

## فصل پنجم

- ۹۳ ۵- ترانزیستور های دو قطبی (BJT)
- ۹۳ ۱-۱ مقدمه
- ۹۴ ۲-۵ انواع ترانزیستورهای دو قطبی
- ۹۹ ۳-۵ قاب ترانزیستورهای افقی و عمودی و کاربرد آن ها در مدارهای VLSI
- ۱۰۰ ۱-۱ ترانزیستورهای npn در مدارهای مجتمع
- ۱۰۱ ۱-۳-۵ ترانزیستورهای pnp در مدارهای مجتمع
- ۱۰۴ ۳-۳-۵ ترانزیستورهای pnp با پایه کالکتور
- ۱۰۶ ۴-۳-۵ ترانزیستورهای  $\beta$  سیر
- ۱۰۷ ۵-۳-۵ فرآیند ساخت ترانزیستورهای عمودی npn
- ۱۱۰ ۶-۳-۵ فرآیند ساخت ترانزیستورهای افقی و عمودی pnp
- ۱۱۳ ۷-۳-۵ ترانزیستورهای دو قطبی رساژ لا
- ۱۱۴ ۸-۳-۵ پیشرفت حاصل در طراحی و ساخت ترانزیستورهای افقی
- ۱۱۶ ۴-۵ بررسی جریان های موجود در BJT ها
- ۱۱۹ ۱-۴-۵ حرکت جریان ها در بیس
- ۱۲۰ ۲-۴-۵ محاسبه جریان کالکتور
- ۱۲۳ ۳-۴-۵ جریان تزریق شده بیس به داخل امیتر
- ۱۲۴ ۴-۴-۵ جریان باز ترکیب در بیس
- ۱۲۶ ۵-۴-۵ جریان تراوشی (نشتی) کالکتور-بیس
- ۱۲۹ ۵-۵ بهره ترانزیستور
- ۱۳۵ ۶-۵ مدل های مختلف ترانزیستورهای BJT

- ۱۳۵ ۵-۶-۱ مدل ابرز- مول
- ۱۳۹ ۵-۶-۲ مدل گامل- یون
- ۱۴۸ ۵-۷ ترانزیستورهای با بیس فلزی (MBT)
- ۱۴۸ ۵-۷-۱ معرفی ترانزیستورهای با بیس فلزی
- ۱۵۱ ۵-۷-۲ اثر لامپ مغناطیسی چرخشی
- ۱۵۳ ۵-۷-۳ ترانزیستورهای لامپ مغناطیسی چرخشی
- ۱۵۵ مکانیسم عبور جریان عمود بر سطح
- ۱۵۵ مکانیسم عبور جریان از سطح

## فصل ششم

- ۱۵۷ ۶-۱ ادوات گذر الکترونی
- ۱۵۷ ۶-۱-۱ مدل در دره ای
- ۱۶۴ ۶-۲ دیودهای پ-n-n<sup>+</sup> گذرالکترونی (IMPATT)
- ۱۶۸ ۶-۱-۳ نرخ یونیزاسیون الکترون و حفره در یک دیود  $p^{+}nn^{+}$
- ۱۷۳ ۶-۳ دیود IMPATT
- ۱۷۹ ۶-۴ جریان و روابط موجود در یک دیود IMPATT

## فصل هفتم

- ۱۸۷ ۷-۱ ادوات اثر میدانی (MOSFET)
- ۱۸۷ ۷-۱ مقدمه
- ۱۸۸ ۷-۲ ویژگی های اکسید سیلیسیوم و عایق های دیگر
- ۱۹۰ ۷-۲-۱ اکسیدهای زیر گیت
- ۱۹۷ ۷-۳ ادوات حافظه دار غیر فرار (ادوات با گیت شناور)
- ۲۰۱ ۷-۴ ترانزیستورهای اثر میدانی (MOSFET)
- ۲۰۱ ۷-۴-۱ ساختار خازن MOS
- ۲۰۲ ساختار ایده آل خازن MOS
- ۲۱۰ ساختار واقعی خازن MOS
- ۲۱۵ ۷-۴-۲ ترانزیستورهای اثر میدانی MOSFET

## فصل هشتم

- ۲۲۳ ۸-۱ ادوات گالیوم آرسناید
- ۲۲۳ ۸-۱ خواص عمومی نیمه هادی GaAs

|     |                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------|
| ۲۲۳ | ۱-۱-۸ مقدمه                                            |
| ۲۲۵ | ۲-۱-۸ تحرک الکترون                                     |
| ۲۲۷ | ۳-۱-۸ پایه نیمه عایق                                   |
| ۲۳۰ | ۴-۱-۸ پایداری در برابر اشعه                            |
| ۲۳۲ | ۵-۱-۸ ادوات گالیوم آرسناید و مقایسه با ادوات سیلیسیومی |
| ۲۳۳ | ترانزیستورهای دو قطبی                                  |
| ۲۳۶ | ترانزیستورهای اثر میدانی با گیت عایق شده IGFET         |
| ۲۳۷ | ترانزیستورهای اثر میدانی پیوندی JFET                   |
| ۲۳۹ | ترانزیستورهای MESFET                                   |

## فصل نهم

|     |                                                      |
|-----|------------------------------------------------------|
| ۲۴۱ | ۹- ترانزیستورهای اثر میدانی فلز- نیمه هادی (MESFET)  |
| ۲۴۱ | ۱-۹ ادوات بدون گیت (قطعات مقاومتی)                   |
| ۲۴۳ | ۲-۹ ادوات با گیت (MESFET)                            |
| ۲۵۳ | ۱-۲-۹ مقاومت های پارازیتی سورس و درین                |
| ۲۵۵ | ۲-۲-۹ وابستگی ضریب هدایت خارجی به فرکانس             |
| ۲۵۶ | ۳-۲-۹ پارامترهای وابسته به فرکانس در MESFET ها       |
| ۲۶۸ | ۴-۲-۹ نویز در ترانزیستورهای MESFET                   |
| ۲۷۱ | ۵-۲-۹ ترانزیستورهای MESFET با گیت تو رفته            |
| ۲۷۴ | ۳-۹ مدل سه منطقه ای برای تعیین وضعیت کانال MESFET ها |

## فصل دهم

|     |                                                 |
|-----|-------------------------------------------------|
| ۲۸۳ | ۱۰- پیوندهای ناهمگن                             |
| ۲۸۳ | ۱۰-۱ مقدمه                                      |
| ۲۹۱ | ۲-۱۰ باند انرژی در پیوندهای ناهمگن ناگهانی      |
| ۲۹۶ | ۳-۱۰ تقریب لایه تخلیه                           |
| ۳۰۱ | ۴-۱۰ معادله پواسون- بولتزمن                     |
| ۳۰۳ | ۵-۱۰ تعیین باند انرژی در پیوندهای ناهمگن تدریجی |
| ۳۰۶ | ۶-۱۰ معادلات رانشی- نفوذی در پیوندهای ناهمگن    |
| ۳۱۰ | ۷-۱۰ اختلاف باند انرژی (ناپیوستگی در باند)      |

## فصل یازدهم

- ۳۱۷ ۱۱- ترانزیستورهای با پیوند ناهمگن (HEMT و HBT)
- ۳۱۷ ۱۱-۱ تحرک باربرها در ترانزیستورهای با آلایش مدوله شده
- ۳۲۱ ۱۱-۲ مکانیسم های پراکندگی در ترانزیستورهای با پیوند ناهمگن
- ۳۲۷ ۱۱-۳ ترانزیستورهای با تحرک بالای الکترون ها (HEMT)
- ۳۴۲ ۱۱-۴ ترانزیستورهای دو قطبی با پیوند ناهمگن (HBT)

۳۵۱

مراجع

۳۶۱

واژه نامه

۳۶۷

نمایه

www.ketab.ir

## پیشگفتار چاپ اول

ادوات نیمه هادی در دهه‌های اخیر جزو لاینفک زندگی بشر شده است و به جرأت می‌توان ادعا کرد که در ساخت تمام تجهیزات مورد نیاز بشر از نیمه هادی‌ها به صورت‌های مختلف استفاده می‌شود. بنابراین مباحث نیمه هادی از اهمیت بسیار زیادی برای دانشجویان کارشناسی ارشد الکترونیک برخوردار است.

درس ادوات نیمه هادی از دروس اجباری-تخصصی دانشجویان کارشناسی ارشد رشته الکترونیک به خصوص گرایش تکنولوژی نیمه هادی‌ها می‌باشد، که اینجانب سالها است به تدریس آن در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مشغول می‌باشم. از این رو در تألیف این کتاب تجربیات چندین ساله خود را مورد استفاده قرار داده‌ام که می‌توان گفت درک بسیار خوبی از قطعاعات نیمه هادی برای دانشجویان این رشته فراهم می‌آورد. هر چند سعی شده است مباحث فصل‌های مختلف کتاب کامل باشد و در این مورد از اطلاعات جدید علمی بهره‌بردایم، اما به هر حال به دلیل رشد روزافزون تکنولوژی نیمه هادی‌ها می‌بایستی در هر گام تدریس این کتاب برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی الکترونیک از منابع روز از جمله مجله‌های معتبر علمی که مباحث کاملاً جدید ادوات نیمه هادی را ارائه می‌کنند، استفاده نمود. در همین جا توصیه می‌شود پس از تدریس هر فصل از کتاب حاضر با مراجعه به یکی از مجلات معتبر تخصصی در این زمینه به تشریح و تدریس یک گزارش علمی اقدام نمود. این کار باعث می‌شود تا دانشجویان پس از فراگیری مباحث کتاب با تئوری‌های روز ادوات نیمه هادی آشنا شوند.

فصل‌های اول و دوم کتاب مباحثی را به خود اختصاص می‌دهند که دانشجویان معمولاً در دوره کارشناسی در درس فیزیک الکترونیک فرا می‌گیرند. لیکن با این وجود ضروری دانستم آن‌ها را مطرح نمایم تا برای آن دسته از دانشجویان و علاقمندان که با مطالب مورد نظر آشنایی کمتری دارند، اطلاعات اولیه فراهم شود. در فصل سوم مباحث کوانتومی تونل زدن الکترون‌ها در نیمه هادی‌ها را بررسی کرده‌ایم. در فصل چهارم تئوری و تکنولوژی پیوندهای شاتکی و همچنین مدل‌های مختلف TE و TFE و FE مورد



بررسی واقع شده است. در فصل پنجم انواع ترانزیستورهای دو قطبی و تئوری مدلهای ابرز - مول و گامل - یون مورد مطالعه قرار گرفته است. فصل ششم اختصاص به بررسی ادوات گذر الکترونی شامل دیودهای میکروویو TRAPATT, IMPATT و... دارد که علاوه بر دانشجویان رشته الکترونیک، دانشجویان رشته مخابرات نیز می‌توانند استفاده نمایند. در فصل هفتم تئوری، تکنولوژی و کاربرد ادوات اثر میدانی مطرح شده است؛ در این فصل علاوه بر بررسی ترانزیستورهای اثر میدانی، ادوات حافظه‌دار غیر فرار (با گیت شناور) نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در فصل هشتم خواص و کاربردهای نیمه هادی GaAs به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در این فصل به طور کلی به مقایسه ادوات سیلیسیومی و گالیوم آرسناید پرداخته‌ایم. فصل نهم ادوات GaAs-MESFET مورد بررسی قرار می‌دهد. در این فصل ادوات MESFET با گیت‌های متعارف و تو رده بررسی شده‌اند. علاوه بر آن تئوری این ترانزیستورها تحت عنوان تئوری سه منطقه‌ای تشریح شده است. در فصل دهم انواع پیوندهای ناهمگن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فصل یازدهم ادوات HEMT را به تفصیل مورد بررسی قرار داده است. در این فصل از ساختارهای مختلف ناهمگن برای بررسی ترانزیستورهای HEMT استفاده شده است. علاوه بر آن در فصل ۱۱ ترانزیستورهای دو قطبی HBT بطور مشروح مطرح شده است.

در انتها از آقای مهندس حسین حسینی نژاد و همسرش آقاى مهندس دارا جمشیدی که در آماده سازی شکل‌های این کتاب نهایت تلاش خود را کرده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم.

تهران ۱۳۸۳

علیرضا صالحی

دانشیار گروه الکترونیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## پیشگفتار چاپ دوم

اکنون که قریب ۹ سال از چاپ اول کتاب می گذرد با توصیه دوستان و دانشجویان تحصیلات تکمیلی تصمیم به ارائه چاپ دوم کتاب گرفته ام. البته اشاره می شود که تغییراتی بجز اصلاح اشتباهات تایپی در آن صورت نگرفته است. اهمیت انتشار این کتاب از آن جهت است که هر چند توسعه میکرو تکنولوژی و نانو تکنولوژی نیمه هادی ها روز به روز توسعه یافته و جهان صنعتی را در جهات مختلف پوشش می دهد، اما بستر تکنولوژی و ملکر ادوات نیمه هادی تغییر نکرده است.

استفاده از ادوات نیمه هادی در تمام لوازم مورد نیاز انسان در قرن حاضر، از اتومبیل گرفته تا کامپیوتر، ماهواره ها، مخابرات و بات ها و اسباب بازی بچه ها اجتناب ناپذیر است. بنابراین یک مهندس ارشد الکترونیک بدون درک صحیح از ساختار و عملکرد ادوات نیمه هادی ها، فاقد توانایی لازم در کار خود می باشد.

کتاب ادوات نیمه هادی از سال ۱۳۸۳ تا کنون در بسیاری از دانشگاه های کشور مورد استفاده قرار گرفته و تدریس شده است. در چاپ حاضر سعی کرده ام که اشتباهات جزئی موجود در چاپ اول را برطرف و با توضیحات اضافی اندکی نسبت به چاپ اول آن را تکمیل نمایم. همانطور که در چاپ اول اشاره شد، درس ادوات نیمه هادی جزو دروس اجباری- تخصصی رشته الکترونیک به خصوص گرایش تکنولوژی نیمه هادی ها است؛ لذا وجود چنین کتابی در دانشگاه ها برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته الکترونیک بسیار با اهمیت می باشد.

تفاوت این کتاب با کتب مشابه در این است که ساختار، عملکرد و همچنین کاربردهای مختلف ادوات نیمه هادی ها به طور دقیق تشریح و توضیح داده شده است، به طوری

که دانش آموختگان و دانشجویان تحصیلات تکمیلی الکترونیک می توانند مباحث آن را به سهولت مورد استفاده قرار می دهند.

در پایان اشاره می کنم، موجب بس خرسندی و خوشحالی خواهد شد که اگر همکاران گرامی در دانشگاه ها و همچنین دانشجویان عزیز نکته نظرات و پیشنهادات خود را به این جانب ارائه نمایند.

علیرضا صالحی

استاد گروه الکترونیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تهران - زمستان ۱۳۹۲

[www.ketab.ir](http://www.ketab.ir)