

ادوات نیمه هادی

www.ketab.ir

تالیف علیرضا صالحی

استاد گروه الکترونیک

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سرشناسه	: صالحی، علیرضا، ۱۳۳۵ -
عنوان و نام پدیدآور	: ادوات نیمه‌هادی/ تالیف علیرضا صالحی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۳۷۷ ص.
شابک	: ۱۵۰۰۰۰ ریال 3-58-600-978:
وضعیت فهرست نویسی	: فیها
موضوع	: نیمه هادی‌ها
موضوع	: نظریه رمزگذاری
موضوع	: مخابرات -- سیستم‌ها
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۲ الف۴۳ص/۷۸۷۱/TK۸۵
رده بندی دیویی	: ۲۸۱۵۲/۶۳۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۳۷۰۵۴۳

نام کتاب: ادوات نیمه‌هادی

مؤلف: دکتر علیرضا صالحی عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ویرایش: دوم

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: ۱۳۹۲

تیراژ: ۵۰۰ جلد

قیمت: ۱۵۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۳۴۴

ISBN: 978-600-6383-58-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۳۸۳-۵۸-۳

ویراستار: عزت نصری نصرآبادی

طرح جلد: امیرحسین حسینی

صحافی: گرنامی

لیتوگرافی: هوررنگ

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

فهرست مطالب

۱	پیشگفتار چاپ اول
۳	پیشگفتار چاپ دوم
۵	مقدمه

فصل اول

۹	۱- مبانی فیزیک حالت جامد
۹	۱-۱ ساختمان بلوری
۱۳	۲-۱ ساختار حالت جامد
۱۵	۳-۱ 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 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	۱-۵ مقدمه
۹۴	۲-۵ انواع ترانزیستور های دو قطبی
۹۹	۳-۵ مقایسه ترانزیستور های افقی و عمودی و کاربرد آن ها در مدار های VLSI
۱۰۰	۱-۳-۵ ترانزیستور های npn در مدار های مجتمع
۱۰۱	۲-۳-۵ ترانزیستور های pnp در مدار های مجتمع
۱۰۴	۳-۳-۵ ترانزیستور های pnp با پایه کالکتور
۱۰۶	۴-۳-۵ ترانزیستور های سوپر β
۱۰۷	۵-۳-۵ فرآیند ساخت ترانزیستور های عمودی npn
۱۱۰	۶-۳-۵ فرآیند ساخت ترانزیستور های افقی و عمودی pnp
۱۱۳	۷-۳-۵ ترانزیستور های دو قطبی و لایه بالا
۱۱۴	۸-۳-۵ پیشرفت حاصل در طراحی و ساخت ترانزیستور های افقی
۱۱۶	۴-۴ 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 ترانزیستور های BJT

- ۱۳۵ ۵-۶-۱ مدل ابرز- مول
- ۱۳۹ ۵-۶-۲ مدل گامل- پون
- 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- ادوات گذر الکترونی
- ۱۵۷ ۶-۱ مدل دو دره‌ای
- ۱۶۴ ۶-۲ دیودهای بهمنی گذر الکترونی (IMPATT)
- ۱۶۸ ۶-۲-۱ نرخ یونیزاسیون الکترون و حفره در یک دیود p^+nn^-
- ۱۷۳ ۶-۳ دیود TRAPATT
- ۱۷۹ ۶-۴ جریان و روابط موجود در یک دیود IMPATT

فصل هفتم

- ۱۸۷ ۷- ادوات اثر میدانی (MOSFET)
- ۱۸۷ ۷-۱ مقدمه
- ۱۸۸ ۷-۲ ویژگی‌های اکسید سیلیسیوم و عایق‌های 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- ادوات گالیوم آرسناید
- ۲۲۳ ۸-۱ خواص عمومی نیمه هادی GaAs

۲۲۳	۸-۱-۱ مقدمه
۲۲۵	۸-۱-۲ تحرک الکترون
۲۲۷	۸-۱-۳ پایه نیمه عایق
۲۳۰	۸-۱-۴ پایداری در برابر اشعه
۲۳۲	۸-۱-۵ 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	۹-۱ ادوات بدون گیت (قطعات مقاومتی)
۲۴۳	۹-۲ ادوات با گیت (MESFET)
۲۵۳	۹-۲-۱ مقاومت های پرازیتی سورس و درین
۲۵۵	۹-۲-۲ وابستگی ضریب هدایت خارجی به فرکانس
۲۵۶	۹-۲-۳ پارامترهای مهم دیگر در MESFET ها
۲۶۸	۹-۲-۴ نویز در ترانزیستورهای MESFET
۲۷۱	۹-۲-۵ ترانزیستورهای MESFET با گیت تو رفته
۲۷۴	۹-۳ مدل سه منطقه ای برای تعیین وضعیت کانال MESFET ها

فصل دهم

۲۸۲	۱۰- پیوندهای ناهمگن
۲۸۳	۱۰-۱ مقدمه
۲۹۱	۱۰-۲ باند انرژی در پیوندهای ناهمگن ناگهانی
۲۹۶	۱۰-۳ تقریب لایه تخلیه
۳۰۱	۱۰-۴ معادله پواسون- بولتزمن
۳۰۳	۱۰-۵ تعیین باند انرژی در پیوندهای ناهمگن تدریجی
۳۰۶	۱۰-۶ معادلات رانشی- نفوذی در پیوندهای ناهمگن
۳۱۰	۱۰-۷ اختلاف باند انرژی (ناپیوستگی در باند)

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

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 هادی ها می باشد، 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 طعناات 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 بهره‌برده‌ایم. اما به هر حال به دلیل رشد روزافزون تکنولوژی نیمه هادی‌ها می‌بایستی در هنگام 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 شود. 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 - پون مورد مطالعه قرار گرفته است. فصل ششم اختصاص به بررسی ادوات گذر الکترونی شامل دیودهای میکروویو IMPATT، TRAPATT 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 را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این فصل ادوات MESFET با گیت‌های متعارف و تو رفته 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 به ویژه آقای 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 عملکرد 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 های فضایی، روبات 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

۲
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

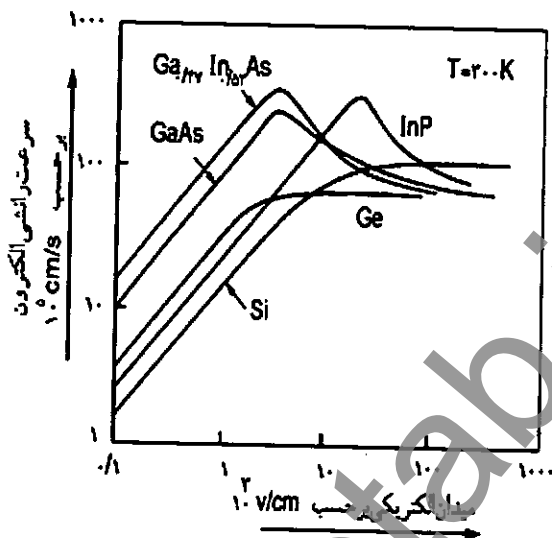
تهران- زمستان ۱۳۹۲

www.ketab.ir

بررسی ادوات نیمه هادی طبیعتاً به بررسی فیزیکی قطعات نیمه هادی مربوط می-شود. اصولاً نیمه هادی‌ها از لحاظ فیزیکی با یکدیگر اختلافات فراوانی دارند، بعضی از آن‌ها از جمله GaAs نسبت به بعضی دیگر مثل Si از تحرک زیاد الکترون و یا سرعت زیاد رانش الکترون برخوردارند. به عبارت دیگر الکترون‌ها در GaAs سریعتر حرکت می‌کنند تا در Si. بنابراین استفاده از بعضی از نیمه هادی‌ها در کیفیت ادوات نیمه هادی تأثیرات قابل توجهی خواهد گذاشت. مثلاً GaAs برای ساخت ادوات نیمه هادی با قدرت فرکانس بالا (فرکانس‌های مایکروویو) بسیار مناسب هستند، در صورتی که Si برای این کار اصلاً مناسب نیست؛ از سوی دیگر Si در ساخت ادوات اثر میدانی (MOSFET) نقش اول را بازی می‌کند. شکل ۱ سرعت رانش الکترون را در یک سری از نیمه هادی شامل GaAs، InP، GaInAs، Ge و Si نشان می‌دهد. در فصل مربوط به ادوات گذر الکترونی (فصل ششم) اختلاف سرعت رانشی الکترون در نیمه هادی‌های متفاوت و عملکرد آن‌ها بررسی خواهد شد.

علم الکترونیک مدت‌هاست که به دنبال ادوات نیمه هادی است که از سرعت بالایی برخوردار باشند. از این رو تحقیقات گسترده‌ای بر روی نیمه هادی GaAs انجام گرفته و هنوز هم ادامه دارد. البته مدتها بود که دانشمندان و صنایع الکترونیک ادعا می‌کردند که در بین خانواده نیمه هادی‌ها، نیمه هادی GaAs در آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت و همیشه هم متعلق به آینده خواهد ماند که عملاً خلاف آن ثابت شده است. در حال حاضر صنایع الکترونیک جهان نیاز به ادوات نیمه هادی‌ای دارد که با فرکانس‌های بسیار بیشتر از ۱۰ GHz کار کنند. مثلاً ادوات نیمه هادی GaAs را می‌توان به گونه‌ای

ساخت که زمان خواندن اطلاعات و عمل منطقی آن ها با سرعت هایی چند برابر سریعتر از Si عمل نماید.



شکل ۱- سرعت رانشی الکترون ها در نیمه هادی های InP , GaAs , Si , GaInAs , Ge نسبت به میدان الکتریکی

عملکرد ادوات نیمه هادی های گروه III-V که جزو خانواده GaAs از جمله HEMT محسوب می شوند (و در فصل ۱۱ بحث خواهند شد) شبیه به عملکرد تکنولوژی بسیار پیچیده پیوند ابررسانایی جو زفسون می باشد. بنابراین در میان ادوات نیمه هادی با قابلیت سرعت زیاد، خانواده GaAs از مزایای بسیار زیادی برخوردار است و اخیراً نقش بیشتری را در میکروالکترونیک و نانوالکترونیک به عهده گرفته است.

اصولاً، نیمه هادی ها دارای مقاومت ویژه بدنه مختلف هستند. به طور کلی مقاومت ویژه بدنه مواد از $10^{-6} \Omega \text{cm}$ تا حدود $10^{22} \Omega \text{cm}$ در نوسان است، در صورتی که مقاومت ویژه بدنه نیمه هادی ها در محدوده $10^{-2} \Omega \text{cm}$ تا $10^9 \Omega \text{cm}$ تغییر می کند. معمولاً نیمه هادی Si می توان با مقاومت ویژه $\rho = 100 \Omega \text{cm}$ رشد داد، در صورتی که نیمه هادی GaAs را می توان با $\rho \approx 10^8 \Omega \text{cm}$ تولید کرد. اختلاف مقاومت ویژه در این دو نیمه هادی که حدود 10^6 می باشد، نشان می دهد که نمی توان از نیمه هادی S

به عنوان عایق استفاده کرد، لیکن از GaAs می‌توان به راحتی به عنوان پایه عایق استفاده کرد که این کار برای ساخت مدارات مجتمع یکپارچه MIC's (که در انتهای فصل یازدهم مطرح خواهند شد) بسیار مناسب می‌باشد.

از طرف دیگر نیمه هادی GaAs نسبت به Si در برابر تشعشعات فضایی از مقاومت بیشتری برخوردار است، بنابراین ادوات ساخته شده با نیمه هادی GaAs می‌توانند برای بسیاری از مدارهای الکترونیکی در فضا و راکتورهای اتمی، افزارهای بسیار مناسبی محسوب شوند. یکی از عواملی که باعث ناتوان شدن ادوات سیلیسیومی در برابر اشعه-های فضایی می‌شود، لایه‌های دی الکتریک می‌باشد که تحت عنوان SiO_2 در MOS استفاده می‌گردد. نکته بسیار مهم دیگر تفاوت باند انرژی نیمه هادی‌ها می‌باشد. مثلاً بر خلاف Si، نیمه هادی GaAs دارای باند انرژی مستقیم می‌باشد و بنابراین برای ساخت بسیاری از ادوات نیمه هادی از جمله ادوات نوری مثل دیود نوری و لیزر مناسب است.

استفاده از GaAs در بعضی از ادوات نیمه هادی نسبت به Si زیان‌هایی نیز دارد. از جمله این که MOSFET را نمی‌توان به وسیله GaAs تولید کرد، زیرا امکان ساخت یک لایه اکسید مناسب در GaAs وجود ندارد. نکته دیگر شکنندگی پولک GaAs می‌باشد که ضریب شکنندگی آن نسبت به Si بسیار بیشتر است، یعنی GaAs قابلیت شکنندگی زیادی دارد.

با توجه به محاسن و معایب نیمه هادی‌های Si و GaAs که در بالا مطرح شد، در این کتاب ادوات ساخته شده با استفاده از این دو نیمه هادی به تفصیل مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. فصول اولیه اختصاص به ادوات مختلف سیلیسیومی دارد و در فصول نهایی ادوات گالیم آرسناید بررسی شده‌اند. نکته حائز اهمیت این است که استفاده از هر دو نیمه هادی در صنایع مختلف میکروالکترونیک و نانو الکترونیک جهان ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین مؤلف سعی کرده است ادوات این دو نیمه هادی را با

توجه به نیاز مراکز آموزش عالی و همچنین صنعت میکروالکترونیک در کشور مورد
بررسی دقیق قرار دهد و با یکدیگر مقایسه نماید.

www.ketab.ir