دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

المان های نیمه هادی قدرت: گذشته، حال حاضر و آینده

صلاح محمدی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی یزدان پناه، دانشگاه فنی و حرفه ای، سنندج Selahmohammad@gmail.com

چکیده

المان های نیمه هادی نقش عمده ای در تولید انرژی های تجدیدپذیر دارند. آنجایی که نیاز به انرژی الکتریکی و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در حال رشد است، پیشرفت در صنعت انرژی و الکترونیک قدرت در راستای این دو نیاز به طور مداوم صورت می گیرد. تحولات در صنعت الکترونیک قدرت به پیشرفت صنعت المان های نیمه هادی بستگی دارد. می توان گفت که صنعت المان های نیمه هادی در آستانه چرخش به عصر جدیدی است، یک تغییر الگو از المان های سیلیکونی معمولی به فناوری نیمه هادی های با پهنای باند گسترده[1] در حالی که کارهای زیادی در بخش های تحقیقاتی و تولیدی در حال انجام است، نگاه به گذشته، ارزیابی پیشرفت فعلی و چشم انداز آینده این صنعت مهم است. این مقاله به دنبال ارائه خلاصه‌ای مناسب از گذشته، پیشرفت‌های روز و برجسته کردن فرصت‌ها برای بهبودهای آینده است. ابتدا مقدمه ای در مورد گذشته این المان ها آورده شده است. سپس المان های نیمه هادی از جنبه های مختلف دسته بندی شده اند. در ادامه وضعیت حال حاضر این المان ها مور بررسی قرار گرفته است. در انتها چشم انداز آینده این المان ها مشخص شده است. برای این منظور روند تکامل المان های پر کاربرد نیمه هادی مانند دیودها، ترانزیستورها و تریستورها، وضعیت آن ها در حال حاضر و چشم انداز آینده مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

دیودهای قدرت، ترانزیستورهای دو قطبی(BJT[2])، ترانزیستورهای دو قطبی با گیت عایق شده(IGBT[3])، المان های نیمه هادی قدرت؛ ترانزیستورهای اثر میدانی با نیمه هادی اکسید فلزی(MOSFET[4])، تریستورها

---

[1] Wide band gap
[2] Bipolar junction transistor
[3] Insulated Gate Bipolar Transistor
[4] metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

۱. مقدمه

آژانس بین المللی انرژی[۵](IEA) افزایش ۲۵ درصدی تقاضای جهانی انرژی اولیه را بین سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۰ پیش بینی کرده است. همچنین پیش‌بینی می‌شود که در صورت عدم بهبود بیشتر در بهره‌وری انرژی در جهان، می‌تواند منجر به افزایش ۵۰ درصدی تقاضای انرژی شود [1]. این افزایش نسبتاً زیاد در تقاضای انرژی در کنار اثرات مخرب تغییر آب و هوا و تخریب سیاره زمین منجر به بهره برداری تهاجمی از انرژی های تجدید ناپذیر و افزایش منابع آلاینده انرژی در طول سال هاست. برای مبارزه با اثرات مضر آلودگی طولانی مدت انسان در محیط زیست و تلاش برای دستیابی به حالت تعادل و پاکی محیطی در سیاره زمین، استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر افزایش یافته است. اگرچه عرضه انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر با ترکیب منابع تامین انرژی همچنان در حال رشد است، برای رسیدن به این حالت تعادل و پاکی در چرخه انرژی، نیاز به افزایش مداوم بازده در تولید، عرضه و استفاده از انرژی وجود دارد. این نیاز محرک انرژی برق، صنعت الکترونیک و در نتیجه محرک صنعت الکترونیک قدرت را تعریف می کند [۴-۲]. پیشرفت صنعت الکترونیک قدرت منوط به سطح پیشرفت در صنعت المان های نیمه هادی قدرت است که به عنوان صنعت دستگاه های الکترونیک قدرت شناخته می شود و این به ویژه به پیشرفت در کلیدهای الکترونیک قدرت بستگی دارد[۵]. صنعت کلید الکترونیک قدرت در طول سال ها به شدت رشد کرده و بهبود یافته است و اکنون در مرحله انتقالی از متداول‌ترین فناوری‌های نیمه‌رسانای سیلیکونی تا فاز کاملاً جدید فناوری‌های پهنای باندگسترده است[۶-۱۳]. این مرحله جدید در حال حاضر با بهبود در انواع مختلف ویژگی ها و تکنیک های ساخت برای کلیدهای الکترونیک قدرت مشخص می شود[۲۳-۱۴]. به طور کلی، پیشرفت در کلیدهای الکترونیکی قدرت در درجه اول برای افزایش سرعت کلیدزنی است، یعنی کاهش زمان روشن و خاموش شدن کلید و افزایش توانی که کلید قادر به کنترل آن است [۲۴،۲۵]. این مقاله به دنبال ارائه یک نمای کلی از یک صنعت به سرعت در حال گسترش و برجسته کردن فرصت های کلیدی برای رشد و بهبودهای موجود است. این کار برای سرعت بخشیدن به ذینفعان جدید در این زمینه (دانشجویان و محققان) و جلب توجه سهامداران تحقیق، توسعه و تولید به فرصت‌های موجود برای بهره‌برداری به منظور تقویت رشد سریع‌تر در صنعت انجام می‌شود. این مقاله مروری منحصر به فرد است که به طور کامل روند تکامل المان های نیمه هادی و وضعیت امروز و چشم انداز آینده آن ها را مشخص می کند[۶،۷].

۲. تاریخچه مختصر المان های نیمه هادی

یکسو کننده قوس جیوه ای (MAR[۶]) که در سال ۱۹۰۰ ساخته شد، اولین وسیله الکترونیک قدرتی است که مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶]. این به سرعت با توسعه سایر المان های الکترونیک قدرت مانند فانترون[۷] تیراترون[۸] یکسو کننده مخزن فلزی[۹] یکسو کننده لوله خلاء کنترل شده شبکه[۱۰] تقویت کننده مغناطیسی و ایگنیترون[۱۱] ذنبال شد [۲۶]. با این حال، صنعت الکترونیک قدرت تا زمانی که تریستورها یا یکسو کننده‌های کنترل‌شده سیلیکونی (SCR[۱۲])وارد عمل نشدند، واقعاً شروع به کار نکردند. SCR ها توسط آزمایشگاه های بل پیشنهاد شدند و جنرال الکتریک آنها را به صورت تجاری در اوایل دهه ۱۹۵۰ تولید کرد [۲۷]. این SCR مقاوم به سرعت در مدارهای یکسوکننده و سیکلوکنورترها پذیرفته شد و بنابراین جایگزین MARها شد. با این حال، ناتوانی SCR در خاموش شدن مستقیم از گیت آن کاملاً یک مانع بود، بنابراین پذیرش آن برای سایر برنامه‌های کاربردی فراتر از حالت کموتاسیون خط کاهش می‌یابد. چندین تکنیک برای کمک به خاموش کردن SCR ها پیشنهاد شد، اما نیاز به المانی که بتواند مستقیماً با گیت خاموش شود بسیار مهم بود زیرا تکنیک های پیشنهادی برای کمک به خاموش کردن SCR ها در توان های بالا غیر عملی بود و در نتیجه کاربرد آن ها را محدود

---

[5] International energy agency
[6] Mercury arc rectifier
[7] Phantron
[8] Thyratron
[9] Metal tank rectifier
[10] Grid controlled vacuum tube rectifier
[11] Magnetic amplifier and ignitron
[12] Silicon controlled rectifiers

کرد[۲۸]. این نیاز باعث کشف ترانزیستورها شد[۲۹،۳۰]. در نوامبر ۱۹۴۷، والتر براتین و جان باردین[۱۳]عملکرد ترانزیستورها را در آزمایشگاه های بل کشف کردند [۳۳-۳۱]. لوله های خلاء قادر به کار در فرکانس های پایین بودند و بنابراین، برای کار در فرکانس های بالاتر، مفهوم نقطه تماس که برای یکسو کننده های حالت جامد[۱۴]ابداع شده بود در ترانزیستورها استفاده شد[۳۱،۳۴]. تحقیقات در زمینه مکانیک کوانتوم مفاهیم هدایت الکترون و ساختار فلزات، نیمه هادی ها و عایق ها را روشن کرد. سایر المان های حالت جامد توسط محققان مختلف اختراع شدند، که شامل ترانزیستورهای اثر میدانی[۱۵](FETs) در سال ۱۹۲۶ توسط لیلینفلد[۱۶]، تقویت‌کننده جامد با سه سیم فلزی توسط پوهل و هیلش[۱۷] در سال ۱۹۳۸، و کریستال های سیلیکون نوع p توسط راسل اوهل[۱۸]در ۱۹۴۰ [۳۶]. توسعه سیستم‌های راداری به طول موج کوتاه‌تر یا فرکانس بالا نیاز دارد که باعث بهبود تحقیقات در المان‌های حالت جامد با ظرفیت کم با توجه به سیلیکون و ژرمانیوم شد [۳۷،۳۸]. اولین ترانزیستور دارای پایه ای از کریستال ژرمانیوم و دو نوک الکترود بود که اولین لایه پوششی از فلز به عنوان کلکتور عمل می کرد، سپس واکس و در ادامه فلز به عنوان امیتر عمل می کرد[۳۹]. الکترولیت به امیتر متصل شد و جریانی که از امیتر به کلکتور می‌رود توسط جریان بیس کنترل می‌شود. بعداً این ترانزیستور در طراحی بهبود یافت و شاکلی[۱۹]مفهوم حامل های اقلیت را با نظریه ترانزیستور پیوند دوقطبی معرفی کرد [۳۷،۴۰،۴۱]. در آوریل ۱۹۵۰، با کریستال ژرمانیوم بسیار نازک به عنوان بیس، اولین ترانزیستورNPN ساخته شد [۴۲]. بعداً با استفاده از تکنیک انتشار،[۲۰]ابتدا ترانزیستورNPN ژرمانیوم با فرکانس ۵۰۰ مگاهرتز و سپس ترانزیستور NPN سیلیکونی که در فرکانس۱۲۰ مگاهرتز کار می کرد، توسعه یافت[۳۶]. پس از این، سیلیکون برای ترانزیستورها ترجیح داده شد، زیرا دارای پهنای باند بزرگ در دماهای پایین برخلاف ژرمانیوم است[۴۳]. ترانزیستور اتصال دوقطبی یک المان نیمه هادی جریانی است و بنابراین در تقویت جریان کاربرد دارد. اولین مدار مجتمع(IC)[۲۱]با استفاده از دو BJT بر روی یک تراشه در سال ۱۹۵۸ [۴۴] آماده شد، زیرا پیاده سازی مدارهای پیچیده با BJT ها آسان بود. بعداً به دلیل مزایای فناوری ترانزیستور اثرمیدان نیمه هادی اکسید فلزی شامل پردازش IC ساده‌تر و بسته‌بندی دستگاه‌های بیشتر روی یک تراشه واحد، آی‌سی‌ها با استفاده از ماسفت‌ها از دهه ۱۹۷۰ تولید شدند[۲۹]. مفهوم ترانزیستور اثر میدانی با گیت عایق شده در ماسفت ها استفاده شد. گیت عایق شده امکان کنترل جریان در کانال نیمه هادی توسط میدان الکتریکی را ایجاد می کند. ماسفت با کانال P با استفاده از تکنیک غیرفعال سازی سطح سیلیکونی،[۲۲]توسط آتلا[۲۳]در سال ۱۹۶۰ پیشنهاد شد ، برای اولین بار توسط شرکت نیمه هادی فایرچیلد[۲۴]پیاده سازی شد. در سال ۱۹۶۴، RCA و فایرچیلد اولین ترانزیستورهای تجاری گسسته ماسفت را ارائه کردند[۴۵]. مزایای MOSFET نسبت به BJT ها باعث شد که آنها فناوری بهتری را برای کاربردهای کامپیوتری داشته باشند که شامل مراحل پردازش کمتر است که به معنای تولید بیشتر محصولات با هزینه کمتر است. در سال ۱۹۷۰، اولین حافظه تک تراشه ۱۰۲۴ بیتی MOS IC، و در سال ۱۹۷۱، اولین ریزپردازنده ۴۰۰۴، تا سال ۱۹۹۰، ۸۰۴۸۶ تراشه ریزپردازنده توسط اینتل با فناوری ماسفت ساخته شد[29]. توسعه ماسفت به عنوان اولین پیوند موفق فن آوری های تولید نیمه هادی قدرت گسسته و مدار مجتمع مدرن شناخته شده است[۴۳]. اگرچه ماسفت به طور گسترده مورد استقبال قرار گرفت، اما محدودیت‌هایی داشت، زیرا این یک المان حامل اقلیت است، ولتاژ حالت روشن آن به مقاومت حالت روشن درین

---

[1] Walter Brattain and John Bardeen
[2] solid-state rectifiers
[3] Field effect transistors
[4] Lilienfeld
[5] Pohl and Hilsch
[6] Russell Ohl
[7] Shockley
[8] diffusion
[9] integrated circuit
[10] silicon surface passivation technique
[11] Atalla
[12] Fairchild

به سورس بستگی دارد، بنابراین منجر به عدم قابلیت ماسفت‌ها برای کاربردهای ولتاژ بالا شده است. از سوی دیگر، تحقیقات مستمری در مورد SCR برای بهبود قابلیت خاموش کردن آن با کاهش بهره روشن شدن آن وجود داشت [۴۶]. این تحقیقات باعث بوجود آمدن تریستورخاموش شونده با گیت[۵۲](GTO) شد [۴۷،۴۸]. با این حال، GTO نیاز به یک جریان گیت زیاد برای خاموش شدن دارد، این امر همراه با هزینه نسبتاً بالاتر آن، کاربرد آن را فقط به اینورترهایی با ظرفیت چند صد KVA محدود می کند[۴۹]. ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق شده (IGBT) برای غلبه بر معایب ترانزیستور دوقطبی با بهره جریان کم، با ترکیب ماسفت و ترانزیستور دوقطبی توسعه داده شد[۳۴]. بنابراین،IGBT در کاربردهای توان متوسط و بالا کاربرد دارد. از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰، محققان در حال کار بر روی ترکیب ماسفت و ترانزیستور دوقطبی برای بهبود وضعیت ضعیف قفل شونده گی این دستگاه ها بودند [۲۹]. سرانجام در سال ۱۹۸۵، ناکاگاوا[۵۶] با موفقیت ساختار IGBT غیرقابل قفل را طراحی کرد[۵۰]. این المان بر معایب یکسوساز گیت عایق شده[۵۷](IGR)، سرعت سوئیچ پایین، منطقه عملیاتی ایمن اتصال کوتاه[۵۸](SOA) و منطقه عملیاتی ایمن بایاس معکوس فائق آمد. برای بهبود ویژگی های سوئیچینگ IGBT، گودمن[۵۹] در سال ۱۹۸۳ لایه بافر +n را با بهبود افت ولتاژ مستقیم معرفی کرد. از آنجایی که IGBT دارای ساختار ماسفت قدرت است، برای بهبود افت ولتاژ مستقیم، فناوری ترانچ-گیت[۶۰] تکنیک‌های یکپارچه‌سازی در مقیاس بسیار بزرگ[۶۱] پیاده‌سازی شد [۵۱]. آرایش نزدیک سلول های حفره، باعث ایجاد عرض بزرگ کانال و مشکلات اتصال کوتاه می شود که فقط با استفاده از مدارهای محدودکننده ی جریان قابل حل هستند. ترکیب تزریق اصافی و IGBT ساختار جدیدی به نام IEGT را با ویژگی‌های افت ولتاژ مستقیم پایین، ساختار گیت سطحی بهبود یافته و افزایش حامل تشکیل می دهد. تاکاهاشی[۶۲] در ادامه بهبود IEGT یعنی CSTBT را معرفی کرد[۳۴]. در حال حاضر، آینده صنعت فناوری نیمه هادی به دنبال استفاده از مواد نیمه هادی مانند کاربید سیلیکون[۶۳](SiC)، نیترید گالیم[۶۴](GaN) و نیترید آلومینیوم[۶۵](AlN) است که دارای پهنای باند انرژی در حدود ۲، ۳/۴ و ۶/۲ الکترون ولت به ترتیب، برای ساخت المان های الکترونیکی قدرت هستند[۵۹-۵۲]. این نیمه هادی ها پایداری مکانیکی، شیمیایی و حرارتی بسیار بالایی دارند[۶۰،۶۱]. این ویژگی‌های پایداری فوق‌العاده بالا، در کنار میدان های شکست عریض و مقاومت های بسیار کم در حالت روشن (گزارش شده است که می تواند ۲۰ برابر کمتر از المان های سیلیکونی باشد) المان های ساخته شده از نیمه هادی های پهنای باند وسیع باعث این امر می شود که این فناوری بسیار امیدوارکننده است و از این رو آینده بالقوه الکترونیک قدرت روشن است[۶۲]. علاوه بر این مزایا، المان های پهنای باند وسیع می‌توانند در فرکانس‌های بالا کار کنند، بنابراین وقتی در مدار مبدل ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، این پتانسیل را دارند که اندازه‌های فیلتر بسیار کمتری نیاز داشته باشند[۷۳-۶۳]. راندمان و چگالی توان مدار مبدل ها نیز هنگام استفاده از کلید با فناوری پهنای باند وسیع بهبود پیدا می کند. در حال حاضر این فناوری عمدتاً در دیودها، MOSFET ها و IGBT ها استفاده می شود[۸۰-۷۴]. با این حال، هیچ شکی وجود ندارد که این فناوری کلید آینده سوئیچ های الکترونیک قدرت است[۸۳-۸۱].

---

2 Gate-Turn-off Thyristor
2 Nakagawa
2 Insulated gate rectifier
2 short circuit safe operating area
2 Goodmann
3 Trench-gate
3 ultra large scale integration
3 Takahashi
3 Silicon-carbide
3 Gallium nitride
3 Aluminum nitride

۳. دسته بندی المان های نیمه هادی قدرت

المان‌های الکترونیک قدرت مدرن را می‌توان به روش‌های مختلفی بر اساس تعداد پایانه‌ها، تعداد اتصالات pn، سطح کنترل‌پذیری، قابلیت دو طرفه و الزامات سیگنال گیت طبقه‌بندی کرد. با در نظر گرفتن تعداد ترمینال ها، المان های الکترونیک قدرت را می توان به دو گروه ۲ ترمینالی و ۳ ترمینالی تقسیم کرد. دیود و دیاک المان های هستند که دارای ۲ ترمینال و تریستورها و ترانزیستورها دارای سه ترمینال هستند. طبقه بندی دیگر المان های الکترونیک قدرت می تواند بر اساس تعداد اتصالات یا لایه های آنها باشد. بر اساس این طبقه بندی، المان های نیمه هادی قدرت را می توان به سه دسته تقسیم کرد: الف) ۱ پیوند یا ۲ لایه، ب) ۲ اتصال یا ۳ لایه ج) ۳ اتصالی یا ۴ لایه ای دیود در گروه المان های تک پیوندی(دو لایه ای)، ترانزیستورها درگروه دو پیوندی و تریستورها سه پیوندی هستند. دسته بندی سوم المان های الکترونیک قدرت بر اساس قابلیت کنترل آنها است. در این طبقه بندی، سه گروه وجود دارد، المان های غیر قابل کنترل، المان های نیمه کنترل و المان های تمام کنترل دیودها و دیاک المان های غیر قابل کنترل هستند. تریستورها(SCR و ترایاک) المان های نیمه کنترل شده هستند به این معنا که فقط روشن شدن آن ها قابل کنترل است. ترانزیستورها، GTO، SIT[3] و MCT[4] المان های تمام کنترل شده هستند که هم روشن شدن و هم خاموش شدن آنها قابل کنترل است. چهارمین دسته بندی بر اساس قابلیت دو طرفه یا یک طرفه بودن جریان آنها است. دیاک، ترایاک و RCT المان های دو چهته هستند. دیودها، ترانزیستورها ، SCR، MCT، GTO و SITH المان های یک جهته هستند. دسته بندی دیگر المان های الکترونیک قدرت نحوه ی راه اندازی و کنترل آن ها است. از این نظر المان های نیمه هادی به سه دسته تقسیم می شوند: دسته اول المان های مانند دیود و دیاک هستند که نیازی به سیگنال راه اندازی ندارند. دسته دوم ترانزیستورها هستند که برای روشن شدن و روشن ماندن نیاز به حضور دایمی سیگنال کنترل دارند. دسته سوم تریستورها هستند که برای روشن شدن نیاز به سیگنال کنترل دارند.

۴. المان های نیمه هادی قدرت در حال حاضر

۴-۱. دیودهای قدرت

دیود المان نیمه هادی دو لایه، یک جهته، غیر قابل کنترل و دارای دو ترمینال آند و کاتد است[۸۴]. به طور کلی سه نوع دیود وجود دارد، دیودهای قدرت، دیود شاتکی و دیود زنر [۸۵]. دیودهای قدرت از نظر سرعت به دو دسته دیودهای فرکانس خط و دیودهای سریع تقسیم می شوند. دیودهای فرکانس خط که به عنوان دیودهای همه منظوره شناخته می شوند، در کاربردهای فرکانس خط(فرکانس ۵۰ تا ۶۰ هرتز) استفاده می شوند. این دیودها دارای زمان بازیابی زیادی هستند و سرعت کلیدزنی پایینی دارند. این دیودها امروزه در ولتاژهای بالا و جریان های بالا یافت می شوند. دیود ZP3000/65-80 دارای V_{RRM} برابر ۸۰۰۰ ولت، جریان متوسط ۳۰۰۰ آمپر است. دیود ZP18000/02-06 دارای V_{RRM} ۶۰۰ ولت و جریان متوسط ۱۸۰۰۰ آمپر است. البته دیودهای قدرت در ولتاژهای خیلی زیاد تا ۴۰۰۰۰ ولت هم موجود هستند. دیود HVLR400 دارای V_{RRM} برابر ۴۰۰۰۰ ولت، جریان متوسط ۵۰ میلی آمپر است. البته دیودهای قدرت در ماژول های ۶۰۰ کیلو ولت هم موجود هستند. ماژول HVBF600 دارای V_{RRM} برابر ۶۰۰ کیلوولت، جریان متوسط ۲۲۰ میلی آمپر است. دیودهای سریع سرعت کلیدزنی بالای دارند و بیشتر در مدارات اینورتری و چاپری کاربرد دارند. این دیودها زمان بازیابی معکوس پایینی دارند و در ولتاژها و جریان های متوسط یافت می شوند. دیود DSEP15-12CR دارای V_{RRM} برابر ۱۲۰۰ ولت، جریان متوسط ۱۵ آمپر و زمان بازیابی معکوس ۱۵ نانو ثانیه است. دیود شاتکی دیودی است که به جای اینکه از اتصال نیمه هادی pn معمولی تشکیل شود از اتصال نیمه هادی n با فلز تشکیل می شود. این دیود دارای افت ولتاژ مستقیم خیلی کم، زمان بازیابی معکوس صفر و سرعت کلیدزنی بالایی دارد. دیود SDA05S120 دارای V_{RRM} برابر ۱۲۰۰ ولت، جریان متوسط ۱۲ آمپر و زمان بازیابی معکوس

---

[3] Static induction transistor
[4] MOS-controlled Thyristor

صفر است. دیودهای شاتکی اغلب در کاربردهای جریان بالا و ولتاژ پایین کاربرد دارند. این دیودها در مقایسه با دیودهای قدرت معمولی جریان نشتی بالایی دارند.

۴-۲- ترانزیستورهای قدرت

ترانزیستورهای قدرت المان های نیمه هادی با دو پیوند pn، یک جهته، تمام کنترل و قابلیت کنترل با فرمان پیوسته جریانی را دارند. این المان دارای سه ترمینال بیس، امیتر و کلکتوراست. ترانزیستورهای قدرت در ولتاژهای و جریان های متوسط موجود هستند. ترانزیستورهای قدرت افت ولتاژ پایینی دارند و قیمت کمتری نسبت به ماسفت وIGBT دارند. ترانزیستور قدرت STN0214 دارای VCE برابر ۱۲۰۰ ولت و جریان متوسط ۲۰۰ میلی آمپر است. از ویژگی های مثبت ترانزیستورهای قدرت می توان به توانایی عملکرد تا توان های چند صد کیلو ولت آمپر، قیمت پایین، ولتاژ تا ۱۵۰۰ ولت، جریان تا ۵۰۰ آمپر و افت ولتاژ هدایت پایین اشاره کرد. از معایب ترانزیستورهای قدرت می توان به زمان کلیدزنی کند نسبت به ماسفت و IGBT، بهره جریان پایین، عملکرد وابسته به دما و ناحیه عمکرد مطمئن پایین اشاره کرد. البته ترانزیستورهای فدرت با اتصال دارلینگتون دارای ضریب بهره جریان بالایی هستند و در قدرت های بالا موجود هستند. ترانزیستور دارلینگتون MJ10021 دارای ولتاژ ۳۵۰ ولت و جریا ن ۶۰ آمپر است.

۴-۳. ماسفت های قدرت

ماسفت های قدرت المان نیمه هادی یک جهته، قابلیت فرمان پیوسته ولتاژی، تمام کنترل و دارای دو پیوند pn است. این المان دارای سه ترمینال درین، گیت و سورس است. در ماسفت های قدرت ترمینال فرمان(گیت) از دو ترمینال دیگر عایق است و تقریبا جریانی از گیت عبور نمی کند[۸۶]. ماسفت های قدرت در دو ساختار کانال N و کانالP ساخته می شوند. به طورکلی ماسفت ها در دو نوع افزایشی و تخلیه ای (کاهشی) ساخته می شوند. ماسفت های افزایشی به دلیل مواد گیت پلی کریستال سیلیکانی کاربرد بیشتری دارند[۸۷]. از مزایای ماسفت های قدرت می توان به کنترل ولتاژی، نیاز به توان پایین برای راه اندازی، سرعت کلیدزنی بالا، درایو کنترل ساده و نداشتن شکست نوع دوم اشاره کرد. از معایب ماسفت های قدرت می توان به افت ولتاژ بالا و احتمال صدمه دیدن بر اثر الکتریسته ساکن اشاره کرد. ماسفت های قدرت در قدرت های پایین مورد استفاده قرار می گیرند. امروزه ماسفت های قدرت در ولتاژهای و جریان های متوسط یافت می شوند. ماسفت STW12N170K5 دارای ولتاژ ۱۷۰۰ ولت و جریان ۵ آمپر است. ماسفت *XPQR3004PB* دارای ولتاژ ۴۰ ولت و جریان ۴۰۰ آمپر است

۴-۴. IGBT

IGBT ترکیبی از ترانزیستورهای قدرت و ماسفت های قدرت است. این ترکیب دارای ویژگی های مثبت ترانزیستور قدرت(افت ولتاژ پایین) و ماسفت قدرت(گیت عایق شده و کنترل ولتاژی) است. IGBT المان یک جهته، با قابلیت کنترل پیوسته ولتاژی، تمام کنترل است. این المان دارای سه ترمینال گیت، امیتر و کلکتور است. امروزه IGBT ها در ولتاژها و جریان های متوسط یافت می شوند. IGBT IXEL40N400 دارای ولتاژ ۴۰۰۰ ولت و جریان ۴۰ آمپر است. برای ولتاژها و جریان های بیشتر IGBT ها به صورت ماژول ساخته می شوند. مازول های IGBT با ولتاژ ۶۵۰۰ ولت و جریان ۳۶۰۰ آمپر یافت می شود. دو نوع ساختار IGBT وجود دارد، ساختارهای مسدود کننده متقارن و نامتقارن[۸۸]. ساختار متقارن را NPT[۳] و ساختار نامتقارن را PT[۴] می نامند. درIGBT های PT افت ولتاژ مستقیم کمتر را می توان با کاهش ضخامت ناحیه N به دست آورد. IGBT های PT فقط در ربع اول مشخصه v-i عمل می کنند و بنابراین در کاربردهای DC می توانند مفید باشد. تفاوت اصلی بین NPT-IGBT و PT-IGBT این است که NPT-IGBT از نظر حرارتی پایدارتر است و افت ولتاژ مستقیم کمتری نسبت به PT-IGBT دارد. NPT-IGBT در مدارهایAC استفاده می شود در حالی

[3] Symmetric and asymmetric blocking structures
[3] Non-punch-through
[4] Punch through

که PT-IGBT در مدارهایDC استفاده می شود [۸۹]. همچنین، ضریب حرارتی ولتاژ حالت وصل NPT-IGBT مثبت است، و باعث می شود NPT-IGBT ها برای موازی کردن مناسب تر باشند در حالی که ضریب حرارتی ولتاژ حالت وصل PT-IGBT تقریباً نزدیک صفر است[۹۰]. PT-IGBT ها سرعت کلیدزنی بالاتر و تلفات انرژی کمتری در هنگام کلیدزنی در مقایسه با NPT-IGBTدارند. [۹۱]. با این حال، NPT-IGBTها از طریق فرآیندی ارزان تری نسبت به PT-IGBT ساخته می شوند.

۴-۵. خانواده تریستورها

خانواده تریستورها المان های نیمه هادی چهار لایه با سه ترمینال آند، کاتد و گیت هستند.[۹۲] . برخی از اعضای برجسته خانواده تریستور شامل: SCR ، GTO، تریستور القایی استاتیک(SITH[4]) ، تریستور کنترل شده با MOS (MCT[5]) ، کلید AC ترایودی (TRIAC[6]) و دیود AC (DIAC[7]). [۹۳] . تریستورها اغلب در مدارات جریان های متناوب استفاده می شوند و زمانی که توان مورد نیاز نسبتاً زیاد است مورد استفاده قرار می گیرند [۹۴]. SCR یک کلید یک طرفه است درست مانند یک دیود اما دارای یک گیت(G) است که روشن شدن آن را کنترل می کند. خاموش کردن تریستور یک فرآیند کاملاً پیچیده است و از این رو یک کلید جدید مبتنی بر تریستور به نام تریستور خاموش شده توسط گیت (GTO) معرفی شد[۹۵]. گرچه تریستور به سرعت در بسیاری از کاربردهای AC مانند درایوهای AC و منابع تغذیه اضطراری (UPS[8]) گسترش پیدا کرد، ناتوانی در خاموش شدن و فرکانس پایین عملکرد (۵۰ تا ۶۰ هرتز) کاربرد آن را محدود کرد، ادعا می‌شود که تریستور تا آنجا که به کاربرد آن مربوط می‌شود به اشباع رسیده است[۹۶]. تریستورها امروزه در ولتاژها و جریان های بالا یافت می شوند. تریستور FT1500AU-240 دارای ولتاژ ۱۲۰۰۰ ولت و جریان ۱۵۰۰ آمپر می باشد. با توجه عدم محدودیت تریستورها در موازی کردن و سری کردن، امروزه ماژول تریستورها در ولتاژهای بالای دویست کیلو ولت و جریان چند ده کیلو آمپرموجود می باشد. GTO دارای فرکانس کاری محدود کمتر از ۵ کیلوهرتز است و طراحی درایو گیت به دلیل نیاز به جریان بزرگ گیت معکوس برای خاموش کردن آن بسیار پیچیده است[۹۷]. GTO ها در ولتاژها و جریان های متوسط موجود هستند. GTO DGT409BCA دارای ولتاژ ۶۵۰۰ ولت و جریان ۱۵۰۰ آمپر می باشد. یکی دیگر از وسایل الکترونیک قدرت جالب در خانواده تریستورها، ترایاک است. یک ترایاک معادل دو تریستورموازی معکوس با یک گیت است. اگرچه استفاده از ترایاک به جای دو تریستور موازی معکوس مقرون به صرفه تر است، اما حساسیت جریانی آن بدتر است، بنابراین به دلیل اثرات ذخیره سازی حامل های اقلیت، زمان خاموشی طولانی تری دارد. فرکانس عملکرد آن مشابه تریستور در فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز است. ترایاک در رله های حالت جامد، دیمر نور، کنترل گرمایش و برخی از لوازم خانگی استفاده می شود[۹۸] . ترایاک در ولتاژها و جریان های پایین یافت می شود. ترایاک BTA100-1800B دارای ولتاژ ۱۸۰۰ ولت و جریان ۱۰۰ آمپر است. دیاک المان نیمه هادی دو جهته است و دارای دو ترمینال است. دیاک المان کنترلی است و بیشتر در مدار کنترل ترایاک مورد استفاده قرار می گیرد و ولتاژ شکست آن از ۲۵ ولت تا ۵۰ ولت است.

SITHها در حدود سال ۱۹۸۸ معرفی شدند و به روشی مشابه GTO خاموش می شوند، نقطه ضعف SITH در مقایسه با GTO این است که افت رسانایی بالاتری دارد .MCTها نیز تقریباً همزمان با SITH ها معرفی شدند و همچنین مانند GTO دارای بهره بالایی در هنگام خاموش شدن هستند[۹۹،۱۰۰]. MCT به طور مداوم در حال بهبود است و می تواند یک تهدید بالقوه برای IGBT باشد زیرا افت ولتاژ کمتری دارد و می تواند در دماهای بالاتر کار کند [۱۰۰،۱۰۱]. RCT ها اساساً با گنجاندن یک دیود موازی معکوس در عرض یک SCRبه منظور دستیابی به جریان مخالف به دست می آیند [۱۰۲]. LASCR[9]، همانطور که از نام آن پیداست، تریستور فعال شونده با نور هستند و در سیستم های ولتاژ و جریان بالا برای دستیابی به ایزوله الکتریکی کامل بین بخش های کنترل و قدرت استفاده می شود [۸۹].

---

1 4 Static induction Thyristor
2 4 MOS-controlled Thyristor
3 4 Triode AC switch
4 4 Diode AC switch
5 4 Uninterruptible power supplies
6 4 Light activated-SCR

۵. آینده المان های نیمه هادی

آینده کلیدهای الکترونیک قدرت با معرفی فناوری پهنای باند وسیع روشن تر است. با توجه به میزان تحقیقات انجام شده در مورد مواد نیمه هادی با پهنای باند بسیارگسترده، حتی آینده امیدوارکننده تر به نظر می رسد. گرچه فناوری نیمه هادی های پهنای باند فوق وسیع هنوز کامل نیست. این بسیار امیدوار کننده است زیرا مواد تشکیل دهنده این کلاس از نیمه هادی ها دارای پهنای باندی تا ۶ برابر سیلیکون هستند. نیمه هادی های ساخته شده از الماس که معمولا سخت ترین ماده هستند، احتمالاً می توانند امیدوار کننده ترین ابر دستگاه آینده باشند. این به دلیل پهنای باند گسترده، رسانایی حرارتی بالا، تحرک الکترون و حفره از جمله ویژگی های جذاب دیگر است. موفقیت‌های به‌دست‌آمده در تحقق زیرلایه‌های تک‌کریستالی ساخت بشر، الکترونیک الماس را حتی امیدوارکننده‌تر می‌کند [۱۰۳]. از سوی دیگر، AlGaN/AlN در حالی که دارای ویژگی های جذاب مشابه الماس است، چالش عمده ای در زمینه بسترهای تک کریستالی موجود با کیفیت کافی برای رشد اپیتاکسی[۴۷] دارد. مکعب-بور-نیترید (c-BN[۴۸]) که در کنار الماس به عنوان دومین ماده سخت قرار دارد، نویدبخش آینده تولید کلید الکترونیک قدرت است. این در صورتی است که بر چالش های پیرامون سنتز آن غلبه شود [۱۰۴]. β-Ga_2-O_3 یکی از تازه واردها در کلاس پهنای باند فوق عریض نیمه هادی ها است، ویژگی ها و در دسترس بودن آن باعث جذابیت خاص آن می شود. نقطه ضعف اصلی آن هدایت حرارتی ضعیف و عدم موفقیت در دوپینگ نوع p[۴۹] است[۱۰۵].

۶. نتیجه گیری

امروزه در تمام شاخه های تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی، ادوات الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار می گیرد و این روند روزافزون است. حوزه المان های الکترونیک قدرت هنوز یک میدان باز با فرصت‌های زیادی برای بهبود و پیشرفت به‌ویژه در خانواده‌های ترانزیستور است. با ظهور ترانزیستورهای با تحرک الکترون بالا(HEMT[۵۰]) ، از طریق بزرگراه فناوری پهنای باند گسترده، تنها چیزی که می توان به دست آورد انجام شده است و شکی نیست که HEMT ها دستگاه های آینده هستند. در این تحقیق مروری بر المان های نیمه هادی مهم مانند دیودها، ترانزیستورها و تریستورها انجام شد. روند تکامل این المان ها، وضعیت حال حاضر آن ها و چشم انداز آینده مورد بررسی قرار گرفت. دیودهای قدرت از لحاظ ولتاژ و جریان تقریبا به تکامل رسیده اند و به راحتی می توان ولتاژهای چند صد کیلو ولت و جریان های چند ده کیلو آمپر را تولید کرد. ترانزیستورهای قدرت به دلیل ارزانی هنوز می تواند انتخاب اول در توان های زیر ۳۰۰ کیلو وات باشد. ماسفت های قدرت رقیب ترانزیستورهای قدرت در قدرت های پایین است و معمولا در سرعت های کلیدزنی بالا و جریان های پایین از ماسفت ها استفاده می شود. IGBT مزایای ترانزیستورهای قدرت و ماسفت ها را با هم دارد و فقط در سرعت های کلیدزنی خیلی زیاد نمی تواند با ماسفت های قدرت رقابت کند. اگر هزینه مانع نباشد، IGBT انتخاب اول خواهد بود. تریستورها به دلیل توانایی کار در ولتاژها و جریان های بالا انتخاب نهایی در توان های بالا هستند. تریستورها در مدارهای AC-AC و AC-DC انتخاب اول هستند. اما در مدارهای DC-DC و DC-AC زمانی از تریستورها استفاده می کنند که ترانزیستورها از لحاظ ولتاژی و جریانی محدودیت دارند.

منابع

[1] IEA-International Energy Agency. World Energy Outlook 2018; IEA: Paris, France, 2018.
Vilathgamuwa, M.; Nayanasiri, D.; Gamini, S. Power Electronics for Photovoltaic Power Systems. Synth. Lect.
[2] Power Electron. 2015, 5, 1–131
[3]. Bose, B.K. GlobalWarming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics. IEEE Ind. Electron. Mag. 2010, 4, 6–17.
[4] Bose, B.K. Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems. Proc. IEEE 2017, 105, 2011–2018.
[5] Mazumder, S.K. An Overview of Photonic Power Electronic Devices. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31,
[6]. Bindra, A. Uncovering the State of Adoption of Wide-Band Gap Power Devices. IEEE Power Electron. Mag. 2018, 5, 4–6.
[7]. Tzou, A.-J.; Hsieh, D.-H.; Chen, S.-H.; Liao, Y.-K.; Li, Z.-Y.; Chang, C.-Y.; Kuo, H.-C. An Investigation of Carbon-Doping-Induced Current Collapse in GaN-On-Si High Electron Mobility Transistors. Electronics 2016, 5, 28.

---

[4] Epitaxial growth
[4] Cubic-Boron-Nitride
[4] P-type doping
[5] High electron mobility transistors

[8]. Dong, Y.; Son, D.-H.; Dai, Q.; Lee, J.-H.; Won, C.-H.; Kim, J.-G.; Chen, D.; Lee, J.-H.; Lu, H.; Zhang, R. High Sensitive pH Sensor Based on Al in N/GaN Hetero Structure Transistor. Sensors 2018, 18, 1314.
[9]. Gu, W.; Xu, X.; Zhang, L.; Gao, Z.; Hu, X.; Zhang, Z. Study on Neutron Irradiation-Induced Structural Defects of GaN-Based Heterostructures. Crystals 2018, 8, 198.
[10]. Yuan, S.-H.; Chang, F.-Y.; Wuu, D.-S.; Horng, R.-H. Al GaN/GaN MOS-HEMTs with Corona-Discharge Plasma Treatment. Crystals 2017, 7, 146.
[11]. Dogmus, E.; Kabouche, R.; Lepilliet, S.; Linge, A.; Zegaoui, M.; Ben-Ammar, H.; Chauvat, M.-P.; Ruterana, P.; Gamarra, P.; Lacam, C. In Al GaN/GaN HEMTs at Cryogenic Temperatures. Electronics 2016, 5, 31
[12]. Caddemi, A.; Cardillo, E.; Patanè, S.; Triolo, C. Light Exposure E_ects on the DC Kink of Al GaN/GaN HEMTs. Electronics 2019, 8, 698.
[13]. Meneghini, M.; Hilt, O.; Wuerfl, J.; Meneghesso, G. Technology and Reliability of Normally-O_ GaN HEMTs with p-Type Gate. Energies 2017, 10, 153.
[14] Zeng, F.; An, J.; Zhou, G.; Li, W.; Wang, H.; Duan, T.; Jiang, L.; Yu, H. A Comprehensive Review of Recent Progress on GaN High Electron Mobility Transistors: Devices, Fabrication and Reliability. Electronics 2018, 7, 377.
[15] Chou, P.-C.; Chen, S.-H.; Hsieh, T.-E.; Cheng, S.; del Alamo, J.; Chang, E. Evaluation and Reliability Assessment of GaN-On-Si MIS-HEMT for Power Switching Applications. Energies 2017, 10, 233.
[16]. Roccaforte, F.; Greco, G.; Fiorenza, P.; Iucolano, F. An Overview of Normally-O_ GaN-Based High Electron Mobility Transistors. Materials 2019, 12, 1599.
[17]. Millaán, J. Wide band-gap power semiconductor devices. Iet Circuits Devices Syst. 2007, 1, 372.
[18]. Chen, R.; Li, R.; Zhou, S.; Chen, S.; Huang, J.; Wang, Z. An X-Band 40WPower Amplifier GaN MMIC Design by Using Equivalent Output Impedance Model. Electronics 2019, 8, 99.
[19]. Han, T.; Liu, H.; Wang, S.; Chen, S.; Li, W.; Yang, X.; Cai, M.; Yang, K. Design and Investigation of the Junction-Less TFET with Ge/Si0.3Ge0.7/Si Heterojunction and Heterogeneous Gate Dielectric. Electronics 2019, 8, 476.
[20]. Guan, H.; Wang, S.; Chen, L.; Gao, B.; Wang, Y.; Jiang, C. Channel Characteristics of InAs/AlSb Heterojunction Epitaxy: Comparative Study on Epitaxies with Di_erent Thickness of in as Channel and Al Sb Upper Barrier. Coatings 2019, 9, 318.
[21]. Zhang, Z.; Guo, B.; Wang, F. Evaluation of Switching Loss Contributed by Parasitic Ringing for Fast Switching Wide Band-Gap Devices. IEEE Trans. Power Electron. 2019, 34, 9082–9094.
[22]. Zhang, Z.; Guo, B.; Wang, F.F.; Jones, E.A.; Tolbert, L.M.; Blalock, B.J. Methodology for Wide Band-Gap Device Dynamic Characterization. IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 9307–9318.
[23]. Ma, J.; Matioli, E. Slanted Tri-Gates for High-Voltage GaN Power Devices. IEEE Electron Device Lett. 2017, 38, 1305–1308.
[24]. Ned, M.; Tore, M.U.; William, P.R. Power Electronics: Converters, Applications and Design, 2nd ed.; John Wiley and Sons Ltd.: New York, NY, USA, 1995.
[25]. Shenai, K. The Figure of Merit of a Semiconductor Power Electronics Switch. IEEE Trans. Electron Devices 2018, 65, 4216–4224.
[26] Mohammed, S.A.; Abdel-Moamen, A.M.; Hasanin, B. A Review of the State-Of-The-Art of Power Electronics For Power System Applications. JECER 2013, 1, 43–52.
[27]. Owen, E.L. Fiftieth anniversary of modern power electronics: The Silicon Controlled Rectifier. In Proceedings of the 2007 IEEE Conference on the History of Electric Power, Newark, NJ, USA, 3–5 August 2007; pp. 201–211.
[28]. Holonyak, N. The silicon p-n-p-n switch and controlled rectifier (Thyristor). IEEE Trans. Power Electron. 2001, 16, 8–16.
[29]. Arns, R.G. The other transistor: Early history of the metal-oxide semiconductor field-e_ect transistor. Eng. Sci. Educ. J. 1998, 7, 233–240.
[30]. Bardeen, J.; Brattain, W.H. The Transistor, A Semiconductor Triode. Proc. IEEE 1998, 86, 29–30.
[31]. Holonyak, N. John Bardeen and the Point-Contact Transistor. Phys. Today 1992, 45, 36–43.
[32]. De_ree, S. “Transistor Caps O_ ‘Miracle Month’, 23 December 1947”. EDN Network. Available online: https://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4403872/Transistor-caps-o_--Miracle-Month--December-23--1947 (accessed on 27 August 2019).
[33]. De_ree, S. “Bell Labs Announces Junction Transistor, 5 July 1951”. EDN Network. Available online: https://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4376734/Bell-Labs-announces-junction-transistor--July-5-1951 (accessed on 27 August 2019).
[34]. Iwamuro, N.; Laska, T. IGBT history, state-of-the-art, and future prospects. IEEE Trans. Electron Devices **2017**, 64, 741–752.
[35]. MacNeil, J. Lilienfeld Patents Field E_ect Transistor, 8 October 1926. EDN Network. Available online: https://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4422371/Lilienfeld-patents-field-e_ect-transistor--October-8--1926 (accessed on 27 August 2019).
[36]. Riordan, M.; Hoddeson, L. Origins of the pn junction. IEEE Spectrum. 1997, 34, 46–51.
[37]. Riordan, M. The lost history of the transistor. IEEE Spectrum. 2004, 41, 44–49.
[38]. Sca_, J.H.; Ohl, R.S. Development of Silicon Crystal Rectifiers for Microwave Radar Receivers. Bell Syst.

Tech. J. 1947, 26, 1–30.
[39]. Goldstein, H. The irresistible transistor. IEEE Spectrum. 2003, 40, 42–47
[40]. Shockley, W.; Pearson, G.L. Modulation of Conductance of Thin Films of Semi-Conductors by Surface Charges. Phys. Rev. 1948, 74, 232–233.
[41]. Shockley, W. A Unipolar 'Field-E_ect' Transistor. Proc. Ire 1952, 40, 1365–1376.
[42]. Meindl, J.D. A history of low power electronics: How it began and where it's headed. In Proceedings of the 1997 International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation—ISSAC '97, Monterey, CA, USA, 18–20 August 1997; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 1997.
[43]. Brinkman, W.F.W.F.; Haggan, D.E.D.E.; Troutman, W.W.W.W. A history of the invention of the transistor and where it will lead us. IEEE J. Solid-State Circuits 1997, 32, 1858–1865
[44]. Early, J.M. Out to Murray Hill to play: An early history of transistors. IEEE Trans. Electron Devices 2001, 48, 2468–2472.
[45]. Bassett, R. New Technology, New People, New Organizations: The Rise of the MOS Transistor, 1945–1975. Bus. Econ. Hist. 1998, 27, 1–7.
[46]. Somos, I. Switching characteristic of silicon power-controlled rectifiers: II—Turn-o_ action and dv/dt self-switching. IEEE Trans. Commun. Electron. 2013, 83, 861–871.
[47]. Becke, H.W.; Neilson, J.M. A new approach to the design of a gate turn-off Thyristor. In Proceedings of the 1975 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Culver City, CA, USA, 9–11 June 1975; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 1975; pp. 292–299.
[48]. Kurata, M. A new cad-model of a gate turn-o_ Thyristor. In Proceedings of the 1974 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Murray Hill, NJ, USA, 10–12 June 1974; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 1974; pp. 125–133.
[49]. Gutzwiller, F.W. Thyristor Semiconductor Components Today. IEEE Trans. Ind. Gen. Appl. 1965, 1, 03–409.
[50]. Nakagawa, A.; Yamaguchi, Y.; Watanabe, K.; Ohashi, H.; Kurata, M. Experimental and numerical study of non-latch-up bipolar-mode MOSFET characteristics. In Proceedings of the 1985 International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 1–4 December 1985; pp. 150–153.
[51]. Johnson, C.M. Current state-of-the-art and future prospects for power semiconductor devices in power transmission and distribution applications. Int. J. Electron. 2003, 90, 667–693.
[52]. Jain, H.; Rajawat, S.; Agrawal, P. Comparison of wide band gap semiconductors for power electronics applications. In Proceedings of the 2008 International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications, Jaipur, India, 21–24 November 2008; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2008; pp. 878–881.
[53]. Yang, L.; Mi, M.; Hou, B.; Zhang, H.; Zhu, J.; Zhu, Q.; Lu, Y.; Zhang, M.; He, Y.; Chen, L. Enhanced g m and f TWith High Johnson's Figure-of-Merit in Thin Barrier Al GaN/GaN HEMTs by TiN-Based Source Contact Ledge. IEEE Electron Device Lett. 2017, 38, 1563–1566.
[54]. Wu, S.; Ma, X.; Yang, L.; Mi, M.; Zhang, M.; Wu, M.; Lu, Y.; Zhang, H.; Yi, C.; Hao, Y. A Millimeter-Wave Al GaN/GaN HEMT Fabricated with Transitional-Recessed-Gate Technology for High-Gain and High-Linearity Applications. IEEE Electron Device Lett. 2019, 40, 846–849.
[55] Bi, Z.; Bacon-Brown, D.; Du, F.; Zhang, J.; Xu, S.; Li, P.; Zhang, J.; Zhan, Y.; Hao, Y. An in GaN/GaNMQWs Solar Cell Improved by a Surficial GaN Nanostructure as Light Traps. IEEE Photonics Technol. Lett. 2018, 30, 83–86.
[56]. Zhang, W.; Zhang, J.; Xiao, M.; Zhang, L.; Hao, Y. Al0.3Ga0.7N/GaN (10 nm)/Al0.1Ga0.9N HEMTs with Low Leakage Current and High Three-Terminal Breakdown Voltage. IEEE Electron Device Lett. 2018, 39, 1370–1372.
[57]. Hammig, M.D.; Chen, X.J.; Campbell, J.C.; Kang, T.; Sun, W.; Johnson, E.B.; Lee, K.; Christian, J. Development of Al0.8Ga0.2As Photodiodes for Use in Wide Band-Gap Solid-State Photomultipliers. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013, 60, 1175–1181.
[58]. Hao, Y.; Yang, L.; Ma, X.; Ma, J.; Cao, M.; Pan, C.; Wang, C.; Zhang, J. High-Performance Microwave Gate-Recessed Al GaN/AlN/GaN MOS-HEMT with 73% Power-Added E_ciency. IEEE Electron Device Lett. 2011, 32, 626–628.
[59]. Zhang, L.; Zhou, H.; Zhang, W.; Dang, K.; Zhang, T.; Ma, P.; Ma, X.; Zhang, J.; Hao, Y. Al GaN-Channel Gate Injection Transistor on Silicon Substrate with Adjustable 4–7-V Threshold Voltage and 1.3-kV Breakdown Voltage. IEEE Electron Device Lett. 2018, 39, 1026–1029.
[60]. Yuan, H.; Song, Q.; Tang, X.; Yuan, L.; Yang, S.; Tang, G.; Zhang, Y.; Zhang, Y. Trench Multiple Floating Limiting Rings Termination for 4H-SiC High-Voltage Devices. IEEE Electron Device Lett. 2016.
[61]. Sui, Y.; Tsuji, T.; Cooper, J.A. On-state characteristics of SiC power UMOSFETs on 115-_m drift layers. IEEE Electron Device Lett. 2005, 26, 255–257.
[62]. Zhang, Y.; Zhang, B.; Li, Z.; Liu, X.; Deng, X. Novel structure of 4H-SiC bipolar junction transistor. In Proceedings of the 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems, Milpitas, CA, USA, 23–25 July 2009; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2009; pp. 641–644.
[63]. Maqueda, E.; Rodas, J.; Toledo, S.; Gregor, R.; Caballero, D.; Gavilan, F.; Rivera, M. Design and Implementation of a Modular Bidirectional Switch Using SiC-MOSFET for Power Converter Applications. Act. Passiv.

Electron. Components 2018, 2018, 4198594.
[64]. Zhao, L.; Ge, Q.; Zhou, Z.; Yang, B.; Li, Y. Research of high-power converter based on the wide band gap power semiconductor devices for rail transit electrical drive. In Proceedings of the 2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia), Xi'an, China, 16–18 May 2018; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 1–4.
[65]. Vechalapu, K.; Bhattacharya, S.; Van Brunt, E.; Ryu, S.-H.; Grider, D.; Palmour, J.W. Comparative Evaluation of 15-kV SiC MOSFET and 15-kV SiC IGBT for Medium-Voltage Converter Under the Same dv/dt Conditions. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2017, 5, 469–489.
[66]. Kamruzzaman, M.; Barzegaran, M.R.; Mohammed, O.A. EMI Reduction of PMSM Drive Through Matrix Converter Controlled with Wide-Bandgap Switches. IEEE Trans. Magn. 2017, 53, 1.
[67]. Wang, M.; Guo, S.; Huang, Q.; Yu, W.; Huang, A.Q. An Isolated Bidirectional Single-Stage DC-AC Converter Using Wide-Band-Gap Devices with a Novel Carrier-Based Unipolar Modulation Technique Under Synchronous Rectification. IEEE Trans. Power Electron. 2017, 32, 1832–1843.
[68]. Ramachandran, R.; Nymand, M. Evaluation of an un-regulated input isolated DC–DC converter using WBG devices. J. Eng. 2019, 3559–3562.
[69]. Cougo, B.; Schneider, H.; Meynard, T. High Current Ripple for Power Density and E_ciency Improvement in Wide Bandgap Transistor-Based Buck Converters. IEEE Trans. Power Electron. 2015, 30, 4489–4504.
[70]. Orr, M.; Finney, S.; Holliday, D. Non-isolated resonant link DC–DC converter for use with GaN devices. J. Eng. 2019, 4200–4204.
[71]. Velander, E.; Bohlin, G.; Sandberg, A.; Wiik, T.; Botling, F.; Lindahl, M.; Zanuso, G.; Nee, H.P. An Ultralow Loss Inductor less dv/dt Filter Concept for Medium-Power Voltage Source Motor Drive Converters with SiC Devices. IEEE Trans. Power Electron. 2018, 33, 6072–6081.
[72]. Gamand, F.; Li, M.D.; Gaquiere, C. A 10-MHz GaN HEMT DC/DC boost converter for power amplifier applications. IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs 2012, 59, 776–779.
[73]. Balda, J.C.; Mantooth, A. Power-Semiconductor Devices and Components for New Power Converter Developments: A key enabler for ultrahigh efficiency power electronics. IEEE Power Electron. Mag. 2016, 3, 53–56.
[74]. Ma, J.; Zanuz, D.C.; Matioli, E. Field Plate Design for Low Leakage Current in Lateral GaN Power Schottky Diodes: Role of the Pinch-o_ Voltage. IEEE Electron Device Lett. 2017, 38, 1298–1301.
[75]. Zhang, T.; Zhang, J.; Zhou, H.; Chen, T.; Zhang, K.; Hu, Z.; Bian, Z.; Dang, K.; Wang, Y.; Zhang, L. A 1.9 kV/2.61 mW_cm2 Lateral GaN Schottky Barrier Diode on Silicon Substrate with Tungsten Anode and Low Turn-On Voltage of 0.35 V. IEEE Electron Device Lett. 2018.
[76]. Zhu, M.; Ma, J.; Nela, L.; Erine, C.; Matioli, E. High-Voltage Normally-o_ Recessed Tri-Gate GaN Power MOSFETs with Low on-Resistance. IEEE Electron Device Lett. 2019, 40, 289–1292.
[77]. Malmros, A.; Gamarra, P.; Di Forte-Poisson, M.-A.; Hjelmgren, H.; Lacam, C.; Thorsell, M.; Tordjman, M.; Aubry, R.; Rorsman, N. Evaluation of Thermal Versus Plasma-Assisted ALD Al2O3 as Passivation for InAlN/Al N/GaN HEMTs. IEEE Electron Device Lett. 2015, 36, 235–237.
[78]. Wang, Y.; Yang, L.-A.; Mao, W.; Long, S.; Hao, Y. Modulation of Multi domain in Al GaN/GaN HEMT-Like Planar Gunn Diode. IEEE Trans. Electron Devices 2013, 60, 1600–1606.
[79]. Khadar, R.M.A.; Liu, C.; Soleimanzadeh, R.; Matioli, E. Fully Vertical GaN-On-Si power MOSFETs. IEEE Electron Device Lett. 2019, 40, 443–446.
[80]. Ma, J.; Matioli, E. High-Voltage and Low-Leakage Al GaN/GaN Tri-Anode Schottky Diodes with Integrated Tri-Gate Transistors. IEEE Electron Device Lett. 2017, 38, 83–86.
[81]. Lu, X.; Huang, S.; Diaz, M.B.; Kotulak, N.; Hao, R.; Opila, R.; Barnett, A. Wide Band Gap Gallium Phosphide Solar Cells. IEEE J. Photovolt. 2012, 2, 214–220.
[82]. Shenai, K. Future Prospects of Wide band gap (WBG) Semiconductor Power Switching Devices. IEEE Trans. Electron Devices 2015, 62, 248–257.
[83]. Matsunami, H. State-of-the-art wide band-gap semiconductors for power electronic devices. In Proceedings of the International Meeting for Future of Electron Devices, Kyoto, Japan, 26–28 July 2004; pp. 21–22.
[84]. Redhead, P.A. The birth of electronics: Thermionic emission and vacuum. J. Vac. Sci. Technol. A Vac. Surf. Film. 1998, 16, 1394–1401.
[85]. The Wikipedians. An Introduction to Electronics; PediaPress GmbH: Mainz, Germany, 2011.
[86] Segura, J.; Hawkins, C.F. CMOS Electronics: How It Works, How It Fails; IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2004.
[87] Liu, S.-C.; Kramer, J.; Indiveri, G.; Delbrück, T.; Douglas, R.; Mead, C.A. Analog VLSI: Circuits and Principles; The MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2002.
[88] Wilamowski, B.M.; Jaeger, R.C. The Lateral Punch-Through Transistor. IEEE Electron Device Lett.1982, 3, 277–280.
[89] Krein, P.T.; Busarello, T.D.C.; Simões, M.G.; Pomilio, J.A.; Gachovska, T.; Wilamowski, B.M.; Hudgins, J.; Santi, E, Eskandari, S.; Tian, B. Power Electronics Handbook, 4th ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018.
[90] Dodge, J.; Hess, J. Application Note APT0201: IGBT Tutorial; Microsemi: Bend, OR, USA, 2002.
[91] Wu, B.; Narimani, M. High-Power Converters and AC Drives: Second Edition, 2nd ed.; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2016.

[92] Ng, K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2002.
[93] Mathur, R.M.; Varma, R.K. Thyristor-Based Facts Controllers for Electrical Transmission Systems; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2002.
[94] Sugandhi, R.K.; Sugandhi, K.K. Thyristors, Theory and Applications; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1981.
[95] Banerjee, S.; Verghese, G.C. Nonlinear Phenomena in Power Electronics: Attractors, Bifurcations, Chaos, and Nonlinear Control; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2001.
[96] De, N.K.; Ray, G.D.; Bhattacharya, T.K. Basic Electrical Technology, 2nd ed.; EE IIT: Kharagpur, India, 2008.
[97] Ramamoorty, M. An Introduction to Thyristors and Their Applications; Macmillan Education: London, UK, 1977.
[98] Blicher, A. Thyristor Physics, 1st ed.; Springer: New York, NY, USA, 1976; Volume 12.
[99] Fisher, C.A.; Paxman, D.H.; Slattep, J.A.G. Design and Performance of a New Static Induction Thyristor-The Gated V-Groove p-i-n Diode. IEEE Trans. Electron Devices 1984, 31, 1299–1308.
[100]. Luryi, S.; Xu, J.; Zaslavsky, A. Future Trends in Microelectronics: Frontiers and Innovations; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2013.
[101] Kirschman, R. High-Temperature Electronics; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 1999.
[102] Burghartz, J.N. Guide to State-of-the-Art Electron Devices; Wiley-IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2013.
[103] Liao, M. Semiconductor diamond. In Ultra-Wide Bandgap Semiconductor Materials; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 111–261.
[104] Zhang, X.; Meng, J. Recent progress of boron nitrides. In Ultra-Wide Bandgap Semiconductor Materials; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 347–419.
[105] Liao, M. Progress in semiconductor β-Ga2O. In Ultra-Wide Bandgap Semiconductor Materials; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 263–345.