

١٤٩١٦

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

٩٨٩٧٣



۱۴۹۱/۸

دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد  
مهندسی برق - قدرت

مدلسازی الکترو- حرارتی ماژولهای الکترونیک قدرت چند- چپبی IGBT  
و شبیه سازی آن در SPICE

نسیم فراهینی

استاد راهنما: دکتر علی یزدیان ورجانی

استاد مشاور: دکتر محمد کاظم مروج فرشی

کتابخانه مرکزی  
شهرستان

۱۵۱۴۰۴

تابستان ۸۶

۹۸۹۷۴



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

خانم نسیم فراهینی پایان نامه ۹ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی مدل الکترو-حرارتی IGBT های سری و موازی توسط HSPICE (مدل مداری) در تاریخ ۱۳۸۶/۵/۱۶ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران                      | نام و نام خانوادگی       | رتبه علمی | امضا |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------|------|
| استاد راهنما                         | دکتر علی یزدیان ورجانی   | استادیار  |      |
| استاد مشاور                          | دکتر محمد کاظم مروج فرشی | استاد     |      |
| استاد ناظر                           | دکتر مصطفی محمدیان       | استادیار  |      |
| استاد ناظر                           | دکتر اخباری              | استادیار  |      |
| مدیر گروه<br>(یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر مصطفی محمدیان       | استادیار  |      |

این نسخه به عنوان نسخه نهایی این پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشند. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته \_\_\_\_\_ است که در سال \_\_\_\_\_ در دانشکده \_\_\_\_\_ دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر \_\_\_\_\_ و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر \_\_\_\_\_ از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

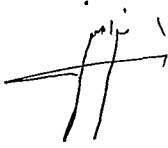
ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالعه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهند به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش و تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب \_\_\_\_\_ نام فراهی  
دانشجوی رشته \_\_\_\_\_ بر - قدرت  
تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.  
مقطع \_\_\_\_\_

۱۳۸۶ / ۱۵ / ۲۲

نام و نام خانوادگی \_\_\_\_\_ نام فراهی

تاریخ و امضاء: ۱۳۸۶ / ۱۱ / ۱۸



## تقدیم به

همسر عزیزم،

که بی دریغ در این راه مرا یاری نمود و مهربانی و شکیبایی او همواره پشتوانه تلاش من بوده است.

دختر نازنینم سارا،

که حضورش گرمابخش لحظه های ماست.

## تقدیم به

### پدر و مادر بزرگوارم،

که به من درس زندگی آموختند و همواره راهنمایان چراغ راه من بوده است.

### پدر و مادر گرامی همسرم،

که همواره تشویقهایشان انگیزه حرکت من بوده است.

با تقدیر و سپاس

از استادان بزرگوارم

جناب آقای دکتر یزدیان

جناب آقای دکتر مروج



## چکیده

در این پایان نامه، یک مدل جدید الکترو-حرارتی دقیق و کارآمد برای ماژولهای هیبریدی الکترونیک قدرت IGBT ارائه و در PSPICE شبیه سازی شده است. این مدل، توانایی شبیه سازی عملکرد ماژول در حالت ماندگار و حالت گذرا را داراست.

مدل، شامل دو بخش الکتریکی و حرارتی است که این دو بخش از طریق پارامترهای وابسته به حرارت مدل الکتریکی با یکدیگر در ارتباطند. برای مدلسازی بخش الکتریکی ماژول، از یک مدل بر پایه فیزیک نیمه هادی که با ارائه به صورت زیرمدارهایی در PSPICE قابل پیاده سازی است، استفاده شده است. برای مدلسازی قسمت حرارتی ماژول که بیانگر نحوه انتشار حرارت در لایه های فیزیکی مختلف ماژول است، از روشهایی که در آنها معادله انتشار حرارت توسط روش المان محدود (FEM) حل شده اند، استفاده شده است. همچنین در این مدل از اندازه گیریهایی که سابقاً برای محاسبه اثرهای حرارتی چیپهای مجاور بر یکدیگر صورت گرفته است، استفاده شده است. مدل جدید، تأثیر حرارتی دینامیکی چیپهای مجاور بر درجه حرارت سطح اتصال چیپ مورد نظر، که اثرگذار بر مقادیر پارامترهای وابسته به حرارت است، را برای اولین بار در شبیه سازیهای الکترو-حرارتی در نظر گرفته است. این مدل، درجه حرارت سطح چیپ را به صورت دینامیکی با تغییر توان تلفاتی لحظه ای چیپ IGBT، محاسبه کرده و اثر آن بر پارامترهای الکتریکی وابسته به حرارت را در خروجی نهایی لحاظ می کند. مدل الکترو-حرارتی بدست آمده، برای یک ماژول هیبریدی IGBT در هنگام کار در حالت اینورتری، به صورت عملی اعتبارسنجی شده است.

واژه های کلیدی: ماژولهای هیبریدی الکترونیک قدرت، IGBT، مدلسازی الکترو-حرارتی، SPICE.

## فهرست

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
|      | فصل اول: مقدمه                                    |
| ۲    | (۱-۱) کلیات                                       |
| ۶    | (۲-۱) مرور ادبیات                                 |
| ۱۰   | (۳-۱) طرح کلی پایان نامه                          |
|      | فصل دوم: ساختمان داخلی و عملکرد IGBT              |
| ۱۲   | (۱-۲) مقدمه                                       |
| ۱۳   | (۲-۲) مقایسه IGBT با BJT و MOSFET قدرت            |
| ۱۳   | (۳-۲) ساختمان داخلی IGBT                          |
| ۱۷   | (۴-۲) مشخصه ولتاژ و جریان IGBT                    |
| ۱۸   | (۵-۲) انواع IGBT                                  |
| ۲۲   | (۶-۲) نارسائیهها و مشکلات IGBT                    |
| ۲۲   | (۱-۶-۲) جریان دنباله ای                           |
| ۲۳   | (۲-۶-۲) لچ-آپ                                     |
| ۲۶   | (۷-۲) خلاصه فصل                                   |
|      | فصل سوم: مدل الکتریکی سلول IGBT                   |
| ۲۸   | (۱-۳) مقدمه                                       |
| ۲۹   | (۲-۳) مدل بخش الکتریکی                            |
| ۲۹   | (۱-۲-۳) دیود قدرت                                 |
| ۳۲   | (۲-۲-۳) IGBT                                      |
| ۳۸   | (۳-۳) زیرمدار معادل IGBT قابل پیاده سازی در Spice |
| ۴۲   | (۴-۳) نحوه وابستگی پارامترهای الکتریکی به حرارت   |
| ۴۴   | (۵-۳) پارامترهای وابسته به حرارت                  |
| ۴۶   | (۶-۳) استخراج پارامترها                           |

|         |   |
|---------|---|
| ۴۶..... | ۳-۶-۱) پارامترهای مدل.....                  |
| ۴۷..... | ۳-۶-۲) متدولوژی استخراج پارامترها.....      |
| ۴۷..... | ۳-۶-۳) استخراج پارامترهای مدل الکتریکی..... |
| ۴۹..... | ۳-۷) خلاصه فصل.....                         |

#### فصل چهارم: برهم کنش دینامیکی بخشهای الکتریکی و حرارتی در ماژولهای الکترونیک قدرت

|         |  |
|---------|--|
| ۵۲..... | ۴-۱) مقدمه.....  |
| ۵۳..... | ۴-۲) تفاوت‌های ساختاری ماژولهای تک-چیپی و چند-چیپی الکترونیک قدرت..... |
| ۵۵..... | ۴-۳) برهم کنش دینامیکی بخشهای الکتریکی و حرارتی.....                   |
| ۵۷..... | ۴-۴) بررسی حرارتی ماژولهای الکترونیک قدرت.....                         |
| ۵۹..... | ۴-۴-۱) اثرات متقابل حرارتی چیپهای مختلف داخل ماژول الکترونیک قدرت..... |
| ۶۱..... | ۴-۴-۲) تکنیک عملی برای اندازه گیری اثرات متقابل حرارتی.....            |
| ۶۵..... | ۴-۵) خلاصه فصل.....  |

#### فصل پنجم: مدلسازی حرارتی ماژولهای الکترونیک قدرت

|         |  |
|---------|--|
| ۶۷..... | ۵-۱) مقدمه.....  |
| ۶۷..... | ۵-۲) مفاهیم پایه در مدلسازی حرارتی.....  |
| ۶۹..... | ۵-۳) بررسی و انتخاب روش مناسب برای تحلیل حرارتی ماژولهای الکترونیک قدرت.....       |
| ۷۰..... | ۵-۳-۱) روش تفاضل محدود (FDM).....  |
| ۷۱..... | ۵-۳-۲) روش المان محدود (FEM).....  |
| ۷۳..... | ۵-۳-۳) روش تحلیلی و تقریب درونی.....   |
| ۷۵..... | ۵-۴) مدلسازی حرارتی ماژول الکترونیک قدرت.....                                      |
| ۷۵..... | ۵-۴-۱) مدل حرارتی چیپ سیلیکون.....   |
| ۷۶..... | ۵-۴-۲) مدل حرارتی ماژول هیبریدی الکترونیک قدرت.....                                |
|         | ۵-۴-۱) استفاده از روش برهم کنش برای مدلسازی برهم کنش حرارتی اجزاء داخلی ماژول..... |
| ۷۷..... | ۵-۴-۲) مدلسازی حرارتی بسته ماژول هیبریدی قدرت.....                                 |
| ۷۹..... | ۵-۴-۲) مدلسازی حرارتی بسته ماژول هیبریدی قدرت.....                                 |
| ۸۶..... | ۵-۵) خلاصه فصل.....  |

## فصل ششم: مدلسازی و شبیه سازی ماژولهای الکترونیک قدرت IGBT

|     |  |
|-----|--|
| ۸۸  | .....مقدمه (۱-۶)   |
| ۸۸  | ..... یک مدل الکترو- حرارتی ماژول تک- چپیی IGBT در PSpice (۲-۶)              |
| ۸۹  | ..... مدل سلول IGBT با در نظر گرفتن اثر خود- گرمایی ماژول (۱-۲-۶)            |
| ۹۰  | ..... مدل الکترو- حرارتی یک IGBT (۲-۲-۶)                                     |
| ۹۲  | ..... مدل الکترو- حرارتی دینامیکی ماژولهای هیبریدی الکترونیک قدرت IGBT (۳-۶) |
| ۹۵  | ..... مدل بخش الکتريکی (۱-۳-۶)   |
| ۹۶  | ..... مدل بخش حرارتی ماژول (۲-۳-۶)   |
| ۱۰۰ | ..... توصیف مدل الکترو- حرارتی ماژول (۳-۳-۶)                                 |
| ۱۰۰ | ..... ارزیابی مدل الکترو- حرارتی ماژول IGBT (۴-۶)                            |
| ۱۰۰ | ..... نتایج شبیه سازی عملکرد IGBT1 به صورت منفرد (۱-۴-۶)                     |
| ۱۰۷ | ..... نتایج حاصل از شبیه سازی مدل الکترو- حرارتی در حالت اینورتری (۲-۴-۶)    |
| ۱۱۲ | ..... خلاصه فصل (۵-۶)  |

## فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| ۱۱۴ | ..... نتیجه گیری (۱-۷)           |
| ۱۱۶ | ..... پیشنهادات (۲-۷)            |
| ۱۱۸ | ..... مراجع                      |
| ۱۲۳ | ..... واژه نامه فارسی به انگلیسی |
| ۱۲۵ | ..... واژه نامه انگلیسی به فارسی |
| ۱۲۷ | ..... پیوستها                    |

علائم اختصاری

| یکای                             | توضیح                            | نشانه               |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| cm <sup>2</sup>                  | سطح همپوشانی درین- سورس          | A <sub>DS</sub>     |
| cm <sup>2</sup>                  | سطح همپوشانی گیت- درین           | A <sub>GD</sub>     |
| J/g/K                            | گرمای ویژه                       | c                   |
| F                                | خازن تخلیه گیت- درین             | C <sub>GDdepl</sub> |
| F                                | خازن درین- سورس                  | C <sub>DS</sub>     |
| F                                | خازن اکسید همپوشانی گیت- درین    | C <sub>ox</sub>     |
| cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> | ثابت دیفیوژن Ambipolar           | D <sub>a</sub>      |
| cm                               | گام گسسته سازی در مدلسازی حرارتی | h                   |
| A                                | جریان بیس در حالت تعادل          | I <sub>0</sub>      |
| A                                | جریان ماسفت داخلی IGBT           | I <sub>Mos</sub>    |
| A                                | مؤلفه جریان الکترونی و حفره ای   | I <sub>n,p</sub>    |
| A                                | جریان الکترونی کلکتور            | I <sub>nC</sub>     |
| A                                | جریان حفره ای کلکتور             | I <sub>pC</sub>     |
| A                                | جریان بیس                        | I <sub>Q</sub>      |
| A                                | جریان اشباع الکترونی امیتر       | I <sub>se</sub>     |
| W/cm/K                           | ضریب انتشار حرارتی               | K                   |
| Ω <sup>-1</sup>                  | هدایت انتقالی                    | K <sub>p</sub>      |
| mm                               | ضخامت سیلیکون                    | L <sub>0</sub>      |
| cm <sup>-3</sup>                 | غلظت الکترونها                   | n                   |
| cm <sup>-3</sup>                 | غلظت حاملهای ذاتی                | n <sub>i</sub>      |
| cm <sup>-3</sup>                 | غلظت حفره ها                     | p                   |
| W                                | توان تلفاتی ورودی                | P <sub>in</sub>     |
| W                                | توان تلف شده در IGBT             | P <sub>IGBT</sub>   |
| W                                | توان تلف شده در دیود             | P <sub>Diode</sub>  |

| یکای        | توضیح  | نشانه           |
|-------------|--|-----------------|
| $W.m^{-2}$  | شار گرما   | q               |
| C           | مقدار بارهای اضافی در بیس                            | Q               |
| C           | مقدار بار بیس در حالت تعادل                          | $Q_0$           |
| $cm^2$      | سطح مؤثر در لایه Baseplate                           | $S_B$           |
| $cm^2$      | سطح مؤثر در لایه ایزولاسیون                          | $S_I$           |
| K           | مقدار افزایش درجه حرارت چپ در اثر عملکرد چپهای مجاور | $\Delta T$      |
| K           | درجه حرارت مطلق                                      | T               |
| S           | طول عمر Ambipolar                                    | $T_a$           |
| V           | ولتاژ درین- سورس                                     | $V_{DS}$        |
| V           | افت ولتاژ ناحیه زیر گیت در حالت تخلیه                | $V_{dep}$       |
| V           | ولتاژ درین-گیت                                       | $V_{dg}$        |
| V           | ولتاژ گیت- سورس                                      | $V_{GS}$        |
| V           | ثابت وابسته به پارامتر                               | $v_n$           |
| V           | ولتاژ آستانه   | $V_T$           |
| mm          | عرض هر لایه از سیستم فیزیکی ماژول                    | w               |
| Cm          | عرض بیس  | $w_b$           |
| Cm          | عرض ناحیه تخلیه پیوند pn                             | $x_j$           |
| rad         | زاویه انتشار حرارت                                   | $\alpha$        |
| $F.cm^{-1}$ | ثابت گذردهی خلأ                                      | $\epsilon_0$    |
| $F.cm^{-1}$ | ثابت دی الکتریک سیلیکون                              | $\epsilon_{si}$ |
| $cm^2/V/s$  | مویلیته الکترون و حفره                               | $\mu_{n,p}$     |
| $g.cm^{-3}$ | چگالی جرمی   | $\rho$          |
| S           | طول عمر حاملها در ناحیه بیس                          | $\tau$          |
| $cm.s^{-1}$ | نرخ جابجائی مرز ناحیه بار فضائی                      | v               |

## فهرست جداول

- ۳-۱) پارامترهای مدل دیود..... ۴۶
- ۳-۲) پارامترهای مدل IGBT..... ۴۶
- ۶-۱) مقادیر معادل حرارتی لایه های با ضخامت کم..... ۹۷
- ۶-۲) میزان تغییرات مقادیر معادل حرارتی طبق اول لایه ایزولاسیون در اثر تغییر توان الکتریکی..... ۹۹
- ۶-۳) مقادیر المانهای مدار معادل حرارتی در  $P_{IGBT1}=150W$ ..... ۹۹

## فهرست شکلها

| صفحه    | عنوان  |
|---------|--|
| ۵.....  | ۱-۱) دیاگرام مدل الکترو-حرارتی.....  |
| ۱۴..... | ۱-۲) ساختار داخلی سلول IGBT به همراه مدل مداری متناظر با آن که از ترانزیستور MOS و PNP تشکیل شده است.....                                  |
| ۱۵..... | ۲-۲) نشانه مداری IGBT به همراه مدار معادل ساده شده آن.....   |
| ۱۷..... | ۳-۲) الف) مشخصه خروجی IGBT ب) مشخصه انتقالی IGBT.....  |
| ۱۹..... | ۴-۲) الف) ساختار داخلی سلول NPT-IGBT، ب) ساختار داخلی سلول PT-IGBT.....  |
| ۲۴..... | ۵-۲) مدل مداری IGBT با در نظر گرفتن ترانزیستور پارازیتی.....   |
| ۲۶..... | ۶-۲) شکل موج جریان IGBT پس از اعمال فرمان قطع.....   |
| ۲۹..... | ۱-۳) ساختار یک دیود p-v-n و نحوه توزیع حاملهای بار در ناحیه با ناخالصی کم در حین عملکرد مستقیم $(n(t_0))$ و هنگام خاموش شدن $(n(t))$ ..... |
| ۳۰..... | ۲-۳) زیرمدار معادل دیود قدرت.....  |
| ۳۰..... | ۳-۳) زیرمدار بار ذخیره شده.....  |
| ۳۲..... | ۴-۳) شماتیکی از یک IGBT از نوع کانال n.....  |
| ۳۵..... | ۵-۳) مدل الکتریکی سلول IGBT.....   |
| ۳۶..... | ۶-۳) جزئیات مدل ماسفت داخلی.....   |
| ۳۹..... | ۷-۳) زیر مدار NPT-IGBT.....  |
| ۴۰..... | ۸-۳) ساختار یک نیم سلول از یک NPT-IGBT و توزیع حاملهای بار در بیس در طول روشن بودن $(n(t_0))$ و در طول خاموش بودن $(n(t))$ .....           |
| ۴۳..... | ۹-۳) دیاگرام ساختار مدلهای الکترو-حرارتی ادوات نیمه هادی.....  |
| ۴۹..... | ۱۰-۳) مشخصه انتقالی اندازه گیری شده (مربعها) و مخاسبه شده (خط).....  |
| ۵۳..... | ۱-۴) بسته تک-چیپی و بسته چند-چیپی.....   |
| ۵۴..... | ۲-۴) ساختار لایه DBC.....  |
| ۵۵..... | ۳-۴) دیاگرام چگونگی ارتباط شبکه های الکتریکی و حرارتی بواسطه مدلهای الکترو-حرارتی ادوات نیمه هادی.....                                     |



|         |  |      |
|---------|--|------|
| ۵۶..... | شماتیک یک نمونه شبکه الکترو- حرارتی.....   | ۴-۴  |
| ۵۸..... | توصیف هندسی و ساختار حرارتی IGBT مورد مطالعه.....                                      | ۴-۵  |
| ۵۹..... | مسیرهای جریان گرما در یک بسته مازول الکترونیک قدرت.....                                | ۴-۶  |
| ۶۰..... | پیوندهای حرارتی ممکن بین اجزای مختلف داخل مازول.....                                   | ۴-۷  |
|         | مدار عملی پیشنهادی برای اندازه گیری اثرات متقابل حرارتی بین اجزای قسمت بالای مدار و    | ۴-۸  |
| ۶۱..... | پایین مدار شکل ۴-۷.....  |      |
| ۶۳..... | اثرات حرارتی IGBT1 بر Diode1، به عنوان تابعی از الف) توان تلفاتی، ب) شرایط مرزی.....   | ۴-۹  |
| ۶۴..... | تغییرات مقاومت حرارتی سطح اتصال تا محفظه، بر حسب توان تلفاتی در چیپها و شرایط مرزی     | ۴-۱۰ |
|         | محفظه (حاصل از شبیه سازی سه بعدی)، الف) IGBT، ب) Diode.....                            |      |
| ۶۹..... | دیاگرام die نیمه هادی.....   | ۵-۱  |
| ۷۱..... | شبکه حرارتی RC بدست آمده از روش FDM.....   | ۵-۲  |
| ۷۲..... | مدار معادل حرارتی بدست آمده توسط روش FEM.....  | ۵-۳  |
| ۷۵..... | مدل حرارتی ماده سیلیکون.....   | ۵-۴  |
| ۷۷..... | مثال تئوری بر هم نهی.....  | ۵-۵  |
| ۷۹..... | زاویه پراکندگی حرارت ( $\alpha$ ).....   | ۵-۶  |
| ۸۰..... | گسسته سازی لایه ایزولاسیون.....  | ۵-۷  |
| ۸۱..... | تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب زاویه $\alpha$ .....                                      | ۵-۸  |
| ۸۲..... | مدل حرارتی مازول.....  | ۵-۹  |
| ۸۴..... | نمودار ماکزیمال درجه حرارت اتصال در IGBT به عنوان تابعی از شرایط مرزی محفظه مازول..... | ۵-۱۰ |
| ۸۵..... | نمودار تغییرات درجه حرارت اتصال و درجه حرارت محفظه مازول در IGBT1.....                 | ۵-۱۱ |
| ۸۵..... | نمودار تغییرات درجه حرارت اتصال و درجه حرارت محفظه مازول در Diode2.....                | ۵-۱۲ |
| ۸۹..... | زیرمدار معادل اصلاح شده IGBT با در نظر گرفتن اثر خود-گرمایی.....                       | ۶-۱  |
| ۹۱..... | مدار معادل مدل الکترو- حرارتی مازول تک-چیپی IGBT با فیدبک دینامیکی حرارتی.....         | ۶-۲  |
| ۹۳..... | نشانه مداری مازول مورد مطالعه.....   | ۶-۳  |
| ۹۴..... | شماتیک مدل الکترو- حرارتی مازول مورد مطالعه در Pspice.....                             | ۶-۴  |
| ۹۵..... | ماژول مورد مطالعه در حالت اینورتری عمل می کند.....                                     | ۶-۵  |
| ۹۸..... | تغییرات مقادیر معادل حرارتی طبقه اول در لایه ایزولاسیون.....                           | ۶-۶  |

- ۷-۶) شکل موجهای IGBT1 در شبیه سازی اینورتر با بار مقاومتی..... ۱۰۳
- ۸-۶) شکل موجهای IGBT2 در شبیه سازی اینورتر با بار مقاومتی..... ۱۰۴
- ۹-۶) شکل موجهای بار در شبیه سازی اینورتر با بار مقاومتی..... ۱۰۵
- ۱۰-۶) نمودارهای درجه حرارت پیوند IGBT1..... ۱۰۶
- ۱۱-۶) شکل موجهای IGBT1 در شبیه سازی اینورتر با بار سلفی..... ۱۰۹
- ۱۲-۶) شکل موجهای IGBT2 در شبیه سازی اینورتر با بار سلفی..... ۱۰۴
- ۱۳-۶) شکل موجهای بار در شبیه سازی اینورتر با بار سلفی..... ۱۰۵
- ۱۴-۶) نمودارهای درجه حرارت پیوند IGBT1 در شبیه سازی اینورتر با بار سلفی..... ۱۰۶

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱) کلیات

سیستم‌های الکترونیک قدرت اغلب برای تبدیل انرژی الکتریکی از یک صورت، به صورت مورد نیاز استفاده می‌شوند. صورت‌های مختلف تبدیل انرژی عبارتند از: AC به AC، AC به DC، DC به DC و AC به DC. این فرآیندهای تبدیل، دارای بازده ۱۰۰٪ نیستند و تلفات آنها به صورت انرژی گرمایی ظاهر می‌شود و باعث افزایش درجه حرارت سیستم می‌شود. تغییرات در دما و مشخصه توزیع مکانی آن، به‌طور قابل توجهی بر رفتار الکتریکی و مکانیکی و در نتیجه مشخصه‌های ورودی و خروجی و بازده سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

امروزه IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)، سوئیچ مورد انتخاب بسیاری از طراحان سیستم‌های الکترونیک قدرت در صنعت است. قطعه نیمه هادی<sup>۱</sup> IGBT از چهار لایه متفاوت، به صورت *pnpn* تشکیل شده است و تفاوت آن با MOSFET قدرت، در وجود یک بستر<sup>۲</sup>  $p^+$  در انتهای درین IGBT است که یک پیوند *pn* تشکیل می‌دهد و باعث تزریق حامل‌های اقلیت به ناحیه درین می‌شود [۱].

IGBT، در ورودی دارای خواص MOSFET و در خروجی دارای خواص BJT است. به عبارتی، ساده‌ترین مدار معادلی که می‌توان برای IGBT در نظر گرفت، یک MOSFET در ورودی است که به صورت دارلینگتون با یک BJT بسته شده باشد. این نیمه هادی، همانند MOSFET از طریق گیت کنترل می‌شود؛ دارای زمان سوئیچینگ کوتاه و تلفات کم هنگام کلیدزنی است. در عین حال مانند BJT، دارای ولتاژ شکست بالا و تلفات هدایت کم هستند. در حقیقت می‌توان گفت این نیمه هادی، مزایای BJT و MOSFET توان بالا را یکجا دارد. به همین دلیل، برای کاربردهای سوئیچینگ در فرکانس بالا و همچنین جریان بالا، بسیار مورد توجه است [۲].

<sup>1</sup> Semiconductor Device

<sup>2</sup> Substrate