

Podzespoły i układy scalone mocy, wykład

Elektronika i telekomunikacja, blok Układy elektroniki przemysłowej
sem. letni 2015/16

Zakres materiału na kolokwium

Organizacja

Kolokwium będzie dwuczęściowe. W części teoretycznej zabronione jest korzystanie z jakichkolwiek materiałów i urządzeń (ewentualne proste obliczenia mogą być wykonane w pamięci). W części praktycznej można korzystać z materiałów wykładowych i dowolnych materiałów własnych (zabronione jest przekazywanie materiałów w trakcie kolokwium oraz korzystanie z gotowych rozwiązań pytań z lat i terminów wcześniejszych); można korzystać z laptopa itp. urządzeń, ale z wyłączonymi komunikatorami, klientami poczty itp. oprogramowaniem oraz bez wchodzenia na strony internetowe o takiej funkcjonalności; niezbędny będzie kalkulator.

Gwiazdka oznacza materiał nieobowiązujący na 1. termin. Skreślenie oznacza tematy nieobowiązujące w bieżącym roku.

Część teoretyczna

Będzie się składać z maksymalnie 3 pytań (1 krótkie + 2 średnie lub 2 krótkie + 1 długie) obejmujących zakres jak niżej (jedno pytanie z każdej grupy zagadnień).

1. Zaawansowane przyrządy półprzewodnikowe mocy

odrębne kolokwium organizowane przez prof. Napieralskiego, ze zrealizowanego przez niego materiału

2. Bezpieczeństwo przyrządów półprzewodnikowych mocy

PDF: 1b → 2 → 3 → 4a

a) bezpieczeństwo cieplne

- czynniki ograniczające temperaturę pracy przyrządów półprzewodnikowych; przebiecie cieplne – zjawisko fizyczne, dodatnie elektrotermiczne sprzężenie zwrotne, temperatura krytyczna na wykresie mocy wydzielanej w złączu półprzewodnikowym i mocy odprowadzanej
- rezystancja cieplna – definicja, zależność od parametrów radiatora; konwekcja i promieniowanie – zjawisko fizyczne, zależność współczynnika przenikania ciepła od parametrów i warunków pracy radiatora; techniki izolacji elektrycznej – zalety i wady; sposoby redukcji rezystancji cieplnej radiatorów; wpływ obudowy i montażu na przewodzenie ciepła (drogi propagacji ciepła, rezystancja cieplna)
- zabezpieczenia: tłumik RL; zabezpieczenia nadprądowe – stany nadprądowe, podział zabezpieczeń, metody i układy detekcji oraz ich właściwości, tranzystory z wyprowadzeniem pomiarowym

b) * bezpieczeństwo napięciowe

- wpływ konstrukcji przyrządu na napięcie przebicia i prąd upływu (MOSFET, IGBT,

BJT): przyrządy unipolarne i bipolarne, skutki zwarcia/rozwarcia końcówki sterującej; wpływ temperatury

- zdolność blokowania w kierunku przewodzenia i wstecznym oraz zdolność przewodzenia w kierunku wstecznym i jej zastosowanie (MOSFET, IGBT, BJT); możliwości wykorzystania diody podłożowej tranzystora MOSFET – problemy i rozwiązania
- zabezpieczenia: ograniczenie propagacji; dioda gasząca – sposób włączenia, działanie, wymagania dotyczące parametrów i montażu; diody Zenera, transile, warystory – charakterystyka, działanie, zalety i wady, sposób włączenia w obwód; zabezpieczenia zwierające przeciw ujemnemu i wysokiemu napięciu; diodowy aktywny tłumik przepięć; tłumiki – zadania, podział; tłumiki napięciowe pasywne stratne RC i stromościowy RCD – schemat, działanie, straty mocy

Przykładowe pytanie:

a) Na jednym wykresie naszkicować uproszczone charakterystyki statyczne stanu blokowania (w obu kierunkach) tranzystorów MOSFET, IGBT i BJT o takim samym napięciu przebicia w kierunku przewodzenia. Wziąć pod uwagę względną wielkość prądu upływu. Założyć, że końcówka sterująca jest zwarta ze wspólną.

b) Jakie zmiany nastąpiłyby po rozwarciu końcówki sterującej?

c) W których przypadkach napięcie przebicia tranzystora jest równe napięciu przebicia złącza PN^- wewnątrz struktury półprzewodnikowej (ograniczyć się do kierunku przewodzenia)? Czy w pozostałych przypadkach napięcie przebicia tranzystora jest mniejsze czy większe od napięcia przebicia złącza PN^- i z czego to wynika?

3. Elementy bierne

a) dławiki

PDF: $4b \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$

- prawa magnetyzmu: indukcja magnetyczna, strumień pola magnetycznego, prawo Faradaya, natężenie pola magnetycznego, prawo Ampère'a, przepływ
- równanie cewki; indukcyjność – zależność od parametrów cewki (wzór), indukcyjność charakterystyczna
- magnesowanie ferromagnetyków: zależność $H = f(i)$ wynikająca z prawa Ampère'a; zależność $B = f(u)$ wynikająca z prawa Faradaya (bez wzorów dla konkretnych przebiegów); krzywa magnesowania; przenikalność magnetyczna (bez zespolonej) – definicje i ich interpretacja na wykresach krzywej magnesowania oraz krzywej Stoletowa; pętla histerezy magnetycznej – parametry, typowe kształty, trajektorie punktu pracy rdzenia i istotna wartość przenikalności przy typowych przebiegach prądu w typowych przekształtnikach; uproszczenia charakterystyki magnesowania
- przebieg prądu dławika w przypadku wymuszonego napięcia (przedziałami stałego, tj. prostokątnego); zmiana w wyniku nasycenia, niekorzystne skutki nasycenia
- * energia zgromadzona w dławiku w funkcji wielkości elektrycznych i w funkcji wielkości magnetycznych; stan ustalony; analiza wpływu założeń projektowych na indukcyjność i rozmiar dławika; wskaźnik wydajności materiału $f \cdot B$
- straty mocy (w rdzeniu i w uzwojeniach): 3 mechanizmy fizyczne (histerezowe,

wiropądowe, Joule'a) – na czym polegają, od czego i jak zależy moc strat

- * efekt naskórkowy – geneza fizyczna, głębokość wnikania (zależność od częstotliwości), skutek dla rezystancji, wpływ na moc strat – przebieg trójkątny o różnym współczynniku tętnienia; alternatywne przekroje uzwojeń i ich zalety – lica, taśma
- materiały magnetyczne najczęściej stosowane w elektronice mocy: właściwości, rzędy wielkości parametrów
- obwody magnetyczne: definicja siły magnetomotorycznej i reluktancji; analogie między dziedziną magnetyczną i elektryczną (w tym praw Kirchhoffa, bez ich uzasadnienia)
- szczelina powietrzna: wielkości magnetyczne stałe i zmieniające się wzdłuż obwodu magnetycznego (konieczne założenia); skutki wprowadzenia szczeliny – μ , L , B , I_{sat} , W_{max} ; cewka na rdzeniu ze szczeliną jako obwód magnetyczny, krzywa magnesowania na płaszczyźnie $\Phi \times ni$; zastępcza przenikalność magnetyczna i natężenie pola magnetycznego, zastępcza charakterystyka magnesowania; rozpraszanie strumienia w szczelinie, jego skutki i zapobieganie

b) * kondensatory

PDF: 8

- impedancja i reaktancja kondensatora idealnego; schemat zastępczy i impedancja kondensatora rzeczywistego (wzór bez R_p); charakterystyka $|Z| = f(f)$ i jej asymptoty (przypadek małej i dużej wartości R_s); wpływ parametrów schematu zastępczego; związek ze zdolnością kondensatora do pełnienia funkcji filtra napięcia; niekorzystny wpływ R_s i L_s na działanie kondensatora
- przebieg napięcia na kondensatorze idealnym i rzeczywistym w przypadku wymuszonego prądu (tylko przebieg prostokątny); wpływ elementów schematu zastępczego
- kąt strat dielektrycznych, moc strat, współczynnik strat; temperatura znamionowa, prąd znamionowy i czas życia oraz związek między nimi; wpływ temperatury i częstotliwości pracy na C , R_s i $\text{tg } \delta$ kondensatora elektrolitycznego
- zasady łączenia równoległego kondensatorów (technologie kondensatorów, obudowy, topografia obwodu drukowanego); skutki uboczne zmniejszenia rezystancji – kondensatory ceramiczne w torze mocy
- technologie kondensatorów tradycyjne i nowe: najważniejsze parametry i właściwości; charakterystyki częstotliwościowe; zmiany parametrów w funkcji temperatury (duże/małe, bez charakterystyk)

Przykładowe pytanie:

a) Podać podstawowe równanie cewki i wyjaśnić występujące w nim symbole.

b) W jaki sposób indukcyjność cewki zależy od pola przekroju, długości i przenikalności magnetycznej rdzenia oraz od liczby zwojów?

c) Dławik pracuje w pewnym przekształtniku, w którym wymuszone zostaje napięcie na dławiku w formie przebiegu podanego niżej (wykres jak na wykładzie). W oparciu o równanie z podpunktu a), naszkicować i uzasadnić przebieg prądu dławika przy założeniu, że nie dochodzi do nasycenia elementu.

d) W jaki sposób zmieniłby się narysowany przebieg, gdyby składowa stała prądu przekroczyła znacząco prąd nasycenia rozważanego dławika? Dodać przykładowy przebieg na wykresie wykonanym w podpunkcie b).

4. Układy scalone

PDF: 9

a) * rozwój układów scalonych mocy

- bloki podlegające scalaniu – kolejne kroki rozwoju technologii
- potencjalne korzyści oraz najistotniejsze problemy związane ze scalaniem układów mocy; najbardziej obiecujące obszary zastosowań

b) elementy struktur

- rodziny układów scalonych (IPM, HVIC, Smart Power): główne cechy, geneza technologiczna, scalane przyrządy i podzespoły, stosowane technologie; rozpoznawanie technologii po zestawie przekrojów dostępnych w niej przyrządów, a także poszczególnych przyrządów
- powody, dla których konieczna jest izolacja (różnice potencjałów, prądy podłożowe); izolacja złączowa: głębokie dyfuzje, izolacja samoczynna; izolacja dielektrykiem: trawienie kieszeni, spajanie płytek, SOI (tlenek zagrzebany), miejscowe utlenianie krzemu (LOCOS), izolacja rowkowa; zalety i wady poszczególnych technik
- poziomy tranzystor wysokonapięciowy MOSFET – LDMOS: przekrój; związek rezystancji warstwy słabo domieszkowanej z wytrzymałością napięciową (w porównaniu z VDMOSem); technika ReSurF – zasada fizyczna, warunek efektywności; techniki double ReSurF – stosowane środki; tranzystor LIGBT – przekrój podstawowy, zaleta w stosunku do LDMOSA

c) technologie

- technologia BCD: dostępne przyrządy półprzewodnikowe; wady i zalety technologii unipolarnych, bipolarnych i BiCMOS;
* schemat i działanie inwertera BiCMOS; proces technologiczny – prosty (dla tranzystorów unipolarnych) i pełny (dla przyrządów uni- i bipolarnych z izolacją złączową)
- technologie monolityczne i hybrydowe: definicja, podstawowe problemy technologiczne, wady i zalety
- hybrydowe technologie Smart Power: wady technologii monolitycznych, zyski z technologii hybrydowych, w jakich przypadkach przeważają; kryteria podziału układu na dwie części; techniki montażu (chip-on-chip, chip-by-chip)
- ~~* hybrydowe technologie IPM: podłoża – zadania, wymagania, technologia DBC; techniki łączenia (lutowanie przez płytkę podłożową, spiekanie bezpośrednie) – uproszczony przekrój i proces technologiczny, wady i zalety~~
- ~~* technologie scalania elementów biernych: PCB, krzemowe monolityczne, Passive IPM~~

~~d) * wybrane układy scalone~~

- ~~sterownik bramki: schemat i działanie obwodu wyjściowego; schemat i działanie samoladującego się układu sterowania tranzystora górnego (bootstrap)~~

Przykładowe pytanie:

- a) W pewnej technologii wykonywać można przyrządy, których przekrój przedstawia rysunek. Czy jest to technologia monolityczna czy hybrydowa? Układy scalone mocy z której z trzech rodzin mogą być w niej wykonywane? Uzasadnić odpowiedzi.*
- b) Dlaczego izolacja jest jednym z głównych problemów technologicznych w dziedzinie układów scalonych mocy?*
- c) Narysować przekrój pokazujący jedną z technik izolacji, która może być zastosowana w technologii z podpunktu a). Wyjaśnić sposób jej realizacji oraz wymienić zalety i wady.*

Część praktyczna

Będzie się składać z 2 częściowych (tj. nie od zera do końcowego wyniku) problemów projektowych z poniższego zbioru. Niezbędne fragmenty kart katalogowych (tranzystora, sterownika bramki, kondensatora, rdzenia itd.) zostaną rozdane.

1. * **Obwód sterowania bramki:** poziom wysoki napięcia, opornik bramkowy, wydajność prądowa sterownika, moc sterowania, moc strat w oporniku bramkowym, wykorzystanie charakterystyki ładunku bramki, wykorzystanie rzeczywistego sterownika scalonego (wydajność prądowa wyjść, spadki napięć na wyjściu, zakres napięcia zasilania), reguły projektowania obwodów drukowanych (wskazać błędy, zaproponować poprawki)
2. **Moc strat i bezpieczeństwo cieplne** (MOSFET, dioda, IGBT): szacowanie mocy czynnej dla określonych parametrów pracy – składowa statyczna i dynamiczna; szczytowa temperatura złącza w przypadku impulsów mocy niepowtarzanych, powtarzanych z dużą i małą częstotliwością; moc i prąd znamionowy; moc i prąd maksymalny dopuszczalny w realnych warunkach chłodzenia bez radiatora i z radiatorem; prądowy dobór tranzystora do warunków (prądu) panujących w konkretnej aplikacji; dobór radiatora (obliczenie rezystancji cieplnej)
3. **Dławik:** prąd dławika – składowa stała i przemienna, wartość średnia, tętnienie, współczynnik tętnienia, wartość szczytowa; tętnienie prądu dla danego przebiegu napięcia (przy założeniu stałości indukcyjności w funkcji prądu, przebieg prostokątny); dobór optymalnego materiału rdzenia na podstawie opisu słownego i charakterystyki $\mu = f(f)$; maksymalna energia gromadzona w polu magnetycznym, minimalna objętość rdzenia; liczba zwojów na podstawie indukcyjności charakterystycznej, korekta wyniku wynikająca z charakterystyki $\mu = f(H)$; przepływ, natężenie pola magnetycznego, indukcja (w oparciu o model uproszczonej krzywej magnesowania); określenie rozsądnej maksymalnej dopuszczanej indukcji na podstawie pętli histerezy, natężenie pola i prąd odpowiadające tej indukcji (w oparciu o model uproszczonej krzywej magnesowania); moc strat w rdzeniu (na podstawie zależności podanej w postaci wzoru lub wykresu); przekrój uzwojenia (dla podanego przyrostu temperatury), rezystancja, moc strat w uzwojeniu; rezystancja cieplna, przyrost temperatury; rdzeń bez szczeliny i ze szczeliną: obwód magnetyczny, reluktancje, indukcyjność, prąd nasycenia, przenikalność zastępcza; stała geometryczna, minimalna długość szczeliny, liczba zwojów, przekrój uzwojenia; efektywna przenikalność magnetyczna i efektywne natężenie pola magnetycznego oraz rzeczywiste natężenie pola magnetycznego w rdzeniu ze szczeliną

4. * **Kondensator:** tętnienie napięcia z uwzględnieniem C i R_s dla podanego przebiegu prądu odcinkami stałego; tętnienie napięcia wyjściowego lub minimalna pojemność dla przetwornicy o jednej z typowych konfiguracji wyjścia (tylko kondensator idealny); moc strat – $\text{tg } \delta$, R_s , prąd skuteczny kondensatora wyjściowego dla 3 podstawowych przetwornic; prąd dopuszczalny i czas życia w różnych warunkach pracy i przy różnych założeniach dotyczących projektowanego urządzenia; sposoby zmniejszenia rezystancji szeregowej i zwiększenia prądu dopuszczalnego (w tym łączenie równoległe); uwzględnienie tolerancji pojemności i starzenia w doborze pojemności nominalnej

Przykładowy problem:

Tranzystor MOSFET IRF540 ma pracować w układzie, w którym maksymalny prąd tego tranzystora wyniesie 20 A.

Rozważając wszystkie kryteria poprawnego załączenia, dobrać poziom wysoki napięcia bramki (impulsy prostokątne) gwarantujący poprawne przełączanie przyrzędu.

Dokonując koniecznych obliczeń stwierdzić, czy sterownik bramki IR2117 jest odpowiedni dla tej aplikacji, jeżeli zastosuje się opornik bramkowy o rezystancji $R_G = 120 \Omega$.

Obliczyć, jak minimalną moc znamionową musi posiadać ten opornik bramkowy.

Materiały

- wykład
- dokumentacja wykonanego projektu przetwornicy (dobór elementów mocy, projekt dławika, projekt obwodu bramki tranzystora)
- odpowiednie instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych (np. B1p, B5, B6; PiUM 6)