

کتاب الکترونیک ۱ و ۲ پارسه

تهیه شده در الکترونیک باز | مرجع دانلود الکترونیک

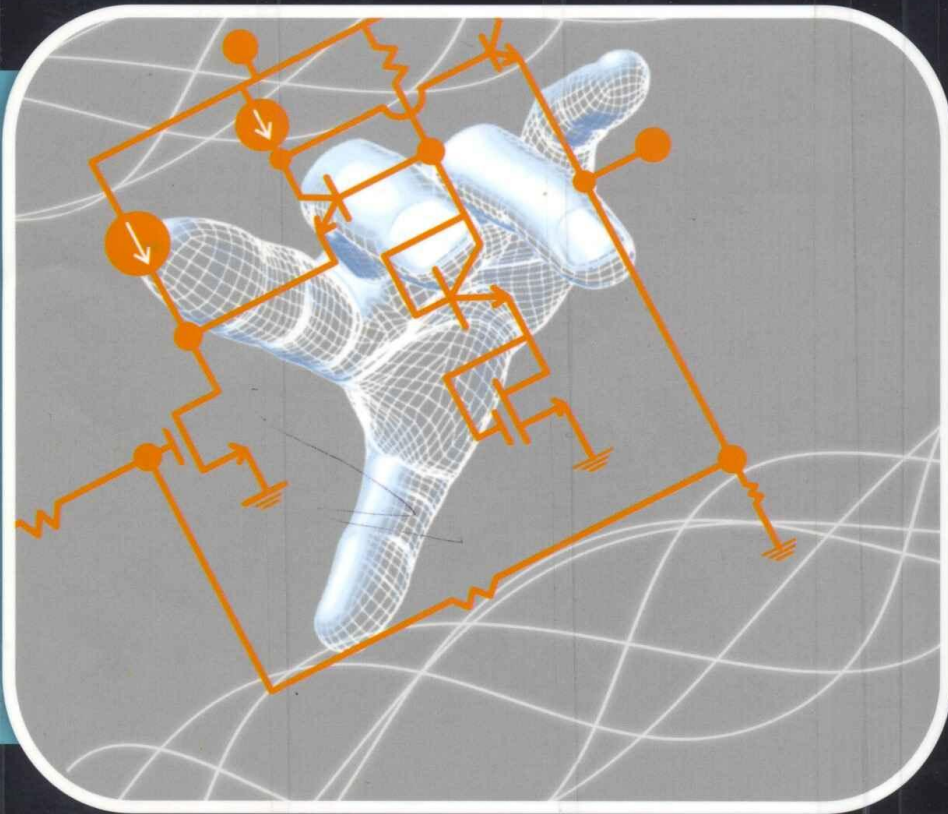
www.gselectronic.ir

تهیه و تنظیم: صادق حدیری فراهانی

Sadegh.heidari.farahani@gmail.com

الکترونیک او ۲

غلامرضا لطیفی



رشته مهندسی برق

قابل استفاده دانشجویان کارشناسی و داوطلبین آزمون کارشناسی ارشد

موسسه آموزش عالی آزاد
پارسا

فهرست

	دیودها	فصل اول
۱	مقدمه	
۱	۱-۱ پیوند	
۲	۲-۱ ناحیه تهی در پیوند	
۳	۳-۱ پیوند تحت بایاس معکوس	
۵	۴-۱ شکست پیوند تحت بایاس مستقیم	
۶	۵-۱ پیوند تحت بایاس مستقیم	
۷	۶-۱ دیود (DioDe)	
۸	۷-۱ مدل DC و مدل ac دیود	
۱۰	۸-۱ مدار آشکارساز قله	
۱۱	۹-۱ باز ذخیره کننده DC	
۱۲	۱۰-۱ مدار دوبرابر کننده و چندبرابر کننده ولتاژ	
۱۳	۱۱-۱ یکسوساز نیم موج	
۱۴	۱۲-۱ یکسوساز تمام موج	

۱۵	۱۳-۱ یکسوساز نیم‌موج با خازن صافی	
۱۶	۱۴-۱ یکسوساز پل با خازن صافی	
۱۷	۱۵-۱ حل تعدادی مسئله نمونه	
۲۵	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۲۷	خودآزمایی	
	ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی (BJT)	فصل دوم
۳۳	مقدمه	
۳۳	۱-۲ ساختمان فیزیکی ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی	
۳۴	۲-۲ چگونگی کار ترانزیستور در حالت فعال	
۳۷	۳-۲ اثر ارلی (early effect)	
۳۸	۴-۲ جریان معکوس کلکتور - بیس ترانزیستور I_{CBO}	
۳۹	۵-۲ بایاس کردن ترانزیستور BJT	
۵۲	۶-۲ مدارهای ترانزیستوری با رفتار تقویت‌کنندگی	
۵۲	۷-۲ سیگنال کوچک در مدارهای ترانزیستوری BJT	
۵۶	۸-۲ ترانزیستور اتصال دیودی	
۵۹	۹-۲ تقویت‌کننده امیتر مشترک (CE)	
۶۵	۱۰-۲ تقویت‌کننده بیس مشترک (CB)	
۶۷	۱۱-۲ تقویت‌کننده کلکتور مشترک (CC)	
۷۰	۱۲-۲ ترانزیستورهای مرکب	
۷۵	۱۳-۲ قضیه میلر ۷۵	
۸۲	۱۴-۲ حداکثر دامنه (V_m) نوسانات در خروجی یک مدار ترانزیستوری	
۸۹	۱۵-۲ ضرب‌کننده V_{BE}	
۹۲	۱۶-۲ پایداری نقاط کار DC در مدارهای ترانزیستوری (BJT)	
۹۸	۱۷-۲ حل تعدادی مثال نمونه	
۱۰۷	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۱۱۵	خودآزمایی	
	ترانزیستورهای اثر میدانی (فتها، FETs)	فصل سوم
۱۲۵	مقدمه	
۱۲۵	۱-۳ ترانزیستورهای ماسفت نوع افزایشی (Enhancement Type)	
۱۲۷	۲-۳ مشخصه‌های ولتاژ و جریان در ترانزیستورهای ماسفت افزایشی	
۱۲۹	۳-۳ ترانزیستور ماسفت در ناحیه تریود (مقاومتی)	

۱۳۴	۴-۳ ترانزیستور در ناحیه فعال (اشباع جریان)
۱۳۶	۵-۳ ترانزیستور ماسفت نوع کاهش یا تخلیه‌ای (Depletion Type)
۱۳۷	۶-۳ ترانزیستور ماسفت کاهش در ناحیه تریود
۱۳۸	۷-۳ ترانزیستور ماسفت کاهش در ناحیه فعال (اشباع جریان)
۱۴۰	۸-۳ ترانزیستور اثر میدانی پیوندی (JFET)
۱۴۳	۹-۳ ترانزیستور اثر میدانی مسفت (MESFET)
۱۴۴	۱۰-۳ تقویت‌کنندگی در آنها
۱۴۷	۱۱-۳ حل مسایل
۱۶۵	مجموعه تست‌های آزمون سراسری
۱۶۹	خودآزمایی

منابع جریان مستقیم

فصل چهارم

۱۷۵	مقدمه
۱۷۵	۴-۱ ویژگی‌های عمومی منابع جریان
۱۷۶	۴-۲ منبع جریان آینه‌ای (آینه جریان) ساده با BJT
۱۸۱	۴-۳ آینه جریان ساده با ترانزیستور ماسفت
۱۸۳	۴-۴ آینه جریان با مقاومت امیتر
۱۸۴	۴-۵ منبع جریان ویدلر
۱۸۶	۴-۶ منبع جریان اوج‌دار
۱۸۸	۴-۷ آینه جریان کاسکود با BJT
۱۸۹	۴-۸ آینه جریان کاسکود با ماسفت
۱۸۹	۴-۹ آینه جریان ویلسون با ترانزیستور BJT
۱۹۱	۴-۱۰ منبع جریان ویلسون با ماسفت
۱۹۳	۴-۱۱ منابع جریان مستقل از منبع تغذیه
۱۹۹	مجموعه تست‌های آزمون سراسری
۲۰۵	خودآزمایی

تقویت‌کننده‌های تفاضلی

فصل پنجم

۲۱۱	مقدمه
۲۱۱	۵-۱ تقویت‌کننده تفاضلی با موج‌های ورودی و خروجی
۲۱۳	۵-۲ عملکرد تقویت‌کننده تفاضلی BJT از دیدگاه موج‌های تفاضلی ورودی
۲۱۵	۵-۳ تقویت‌کننده تفاضلی در ناحیه کلید (سوئیچ تفاضلی)
۲۱۵	۵-۴ تقویت‌کننده تفاضلی BJT (سیگنال کوچک)

۲۱۷	۵-۵ تقویت کننده تفاضلی با مقاومت امیتر
۲۲۰	۵-۶ عملکرد تقویت کننده تفاضلی مربوط به موج های وجه مشترک ورودی
۲۲۲	۵-۷ پاسخ فرکانسی مربوط به بهره وجه مشترک و CMRR
۲۲۳	۵-۸ تقویت کننده تفاضلی با ماسفت
۲۲۶	۵-۹ تقویت کننده تفاضلی با ترانزیستور JFET
۲۲۹	۵-۱۰ ولتاژ افست در تقویت کننده تفاضلی (offset voltage)
۲۳۲	۵-۱۱ بررسی انواع مختلف تقویت کننده های تفاضلی
۲۵۱	مجموعه تست های آزمون سراسری
۲۵۹	خودآزمایی

تقویت کننده های با پس خورد منفی (فیدبک منفی)

فصل ششم

۲۶۵	مقدمه
۲۶۶	۱-۶ ساختار پس خورد منفی
۲۶۷	۲-۶ ساختارهای چهار گانه پس خوردی (توپولوژی چهار گانه)
۲۶۷	(الف): فیدبک نمونه ولتاژ - جمع ولتاژ (ولتاژ - سری)
۲۶۸	(ب): فیدبک نمونه ولتاژ - جمع جریان (ولتاژ - موازی)
۲۶۹	(ج): فیدبک نمونه جریان - جمع ولتاژ (جریان - سری)
۲۷۰	(د): فیدبک نمونه جریان - جمع جریان (جریان - موازی)
۲۷۱	۳-۶ تشخیص نوع فیدبک
۲۷۱	(الف): نمونه برداری از ولتاژ خروجی
۲۷۲	(ب): نمونه برداری از جریان خروجی
۲۷۲	(ج): جمع به صورت جریان در ورودی
۲۷۳	(د): جمع به صورت ولتاژ در ورودی
۲۷۳	۴-۶ روش محاسبه بهره و مقاومت های خروجی و ورودی یک مدار فیدبک دار
۲۷۵	(الف): فیدبک ولتاژ - سری و مسایل مربوطه
۲۸۴	(ب): فیدبک ولتاژ - موازی و مسایل مربوطه
۲۹۱	(ج): فیدبک جریان - سری و مسایل مربوطه
۳۰۰	(د): فیدبک جریان - موازی و مسایل مربوطه و حل تعدادی مسایل نمونه دیگر
۳۱۱	مجموعه تست های آزمون سراسری
۳۱۹	خودآزمایی

تقویت کننده های توان

فصل هفتم

۳۲۳	مقدمه
-----	-------

۳۲۳	۱-۷ دسته‌بندی تقویت‌کننده‌های توان	
۳۲۴	۲-۷ پارامترهای مورد نظر در تقویت‌کننده‌های توان	
۳۲۸	۳-۷ اعوجاج موج خروجی در یک تقویت‌کننده	
۳۳۲	۴-۷ ارزیابی تقویت‌کننده توان	
۳۳۳	۵-۷ تقویت‌کننده توان کلاس A	
۳۴۲	۶-۷ تقویت‌کننده کلاس B و پوش - پول کلاس B	
۳۴۹	۷-۷ تقویت‌کننده پوش - پول کلاس AB	
۳۵۲	۸-۷ محدودکننده جریان در تقویت‌کننده‌های توان	
۳۵۷	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۳۶۵	خودآزمایی	
	تقویت‌کننده‌های عملیاتی	فصل هشتم
۳۶۹	مقدمه	
۳۶۹	۱-۸ ساختار داخلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی (آپ - امپ‌ها)	
۳۷۰	۲-۸ بررسی و حل تعدادی از مسایل مربوط به آپ - امپ‌ها	
۳۹۹	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۴۰۷	خودآزمایی	
	تنظیم‌کننده‌های ولتاژ (رگولاتورهای ولتاژ)	فصل نهم
۴۱۱	مقدمه	
۴۱۲	۱-۹ تنظیم‌کننده ولتاژ با دیود زبر بدون مدار فیدبک	
۴۱۷	۲-۹ تنظیم‌کننده ولتاژ با مدار فیدبک	
۴۲۵	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۴۲۹	خودآزمایی	
	پاسخ فرکانس پایین تقویت‌کننده‌ها	فصل دهم
۴۳۱	مقدمه	
۴۳۲	۱-۱۰ محدوده فرکانس پایین در تقویت‌کننده‌ها	
۴۳۳	۲-۱۰ محاسبه پاسخ فرکانسی و فرکانس (فرکانس قطع پایین)	
۴۳۶	۳-۱۰ خازن‌های کوپلاژ	
۴۳۹	۴-۱۰ خازن‌های بای پس	
۴۴۹	مجموعه تست‌های آزمون سراسری	
۴۵۳	خودآزمایی	

فصل ۱ دیودها

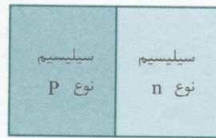
مقدمه

تمام مدارهای الکترونیکی مجموعه‌ای از عناصر خطی و غیر خطی هستند که برحسب نوع فرایند مورد نظر، ترکیب‌های گوناگونی را به خود اختصاص می‌دهند. عناصر خطی شامل مقاومت‌ها، خازن‌ها و پیچک‌ها هستند. عناصر غیر خطی شامل دیودها و انواع ترانزیستورها، انواع تریستورها و... هستند. همه عناصر غیر خطی از پیوندهای نیمه‌رسانا تشکیل می‌شوند. مدارهای صنعتی مجموعه‌ای از مدارهای مجتمع و یا مدارهای نامجمع و یا به صورت مخلوطی از این دو ساختار هستند. مدارهای مجتمع (Integrated Circuits) در جریان‌های کم و ولتاژهای کم به کار می‌روند، درحالی‌که مدارهای نامجمع (Discrete Circuits) عمدتاً برای ولتاژها و جریان‌های زیادتری به کار می‌روند که از حوزه کار مدار مجتمع خارج است.

۱-۱ پیوند pn

پیوند pn از نیمه‌هادی‌های نوع (p) و نوع (n) تشکیل شده است که به صورت یک مجموعه (قطعه) به کار گرفته می‌شوند. این پیوندها در حالت گرایش مستقیم (یعنی ولتاژ مثبت به p و ولتاژ منفی به n) و یا در حالت گرایش معکوس (یعنی ولتاژ مثبت به n و ولتاژ منفی به p) مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصطلاح بایاس مستقیم و بایاس معکوس در بسیاری از مواقع به‌جای گرایش مستقیم و گرایش معکوس به کار برده می‌شود. پیوند pn در حالت بایاس مستقیم و بایاس معکوس، رفتار اساسی دیودها و ترانزیستورهای دوقطبی و ترانزیستورهای اثر میدانی و تریستورها را توسط تغییر اندازه پهنای ناحیه تهی (Depletion Region) تعریف می‌کند. در شکل (۱-۱) پیوند pn شامل ماده نیمه‌رسانای نوع (p) در تماس نزدیک با ماده نیمه‌رسانای نوع (n) نشان داده شده است. ماده نیمه‌رسانای نوع (p) از بلور سیلیسیم است که با آلایندگی 3 ظرفیتی نظیر (بور) و ماده نیمه‌رسانای نوع (n) از بلور سیلیسیم است که با آلایندگی 5 ظرفیتی نظیر (فسفر) ساخته می‌شوند. بلور سیلیسیم در هر سانتی‌متر مکعب تعداد 5×10^{22} اتم دارد. سیلیسیم ذاتی، شبکه منظمی دارد که در آن اتم‌ها با پیوند کووالانسی 4 ظرفیتی در محل خود قرار گرفته‌اند. در دمای معمولی برخی از پیوندها به سبب گرما شکسته شده و تعدادی الکترون آزاد می‌شود. هنگامی که یک پیوند شکسته شود، یک الکترون از اتم آزاد می‌شود و آن اتم دارای بار مثبتی برابر با بار الکترون خواهد شد. الکترون از اتم مجاور جذب این بار مثبت می‌شود، در این صورت حفره‌ای (بار مثبت) در اتم مجاور ایجاد می‌شود. این فرایند دمایی خودبه‌خود تکرار می‌شود و در نتیجه حامل‌هایی با بار مثبت یا به عبارتی حفره‌هایی وجود دارند که در ساختار بلور سیلیسیم حرکت می‌کنند که می‌توان آن‌ها را برای هدایت جریان الکتریکی به کار برد. در بلور سیلیسیم ذاتی در دمای حوالی 27 درجه سانتی‌گراد تقریباً

حامل 1.5×10^{10} وجود دارد که به آن (n_i) گفته می‌شود: $(n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \frac{\text{حامل}}{\text{cm}^3})$ به همین دلیل سیلیسیم یک عنصر نیمه رساناست.



شکل ۱-۱ پیوند pn

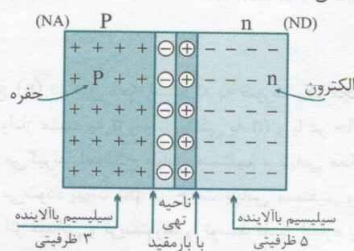
در این صورت، n_i چگالی حامل‌های ذاتی در بلور سیلیسیم است.

چگالی آلاینده نوع n (ماده 5 ظرفیتی)، $N_D (\frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3})$ و چگالی آلاینده نوع P (ماده 3 ظرفیتی)، $N_A (\frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3})$ است.

به فرض اگر $N_D = 10^{16} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ و $N_A = 10^{15} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ باشد، دیده می‌شود که به ازای هر 5×10^6 اتم سیلیسیم، فقط یک اتم 5 ظرفیتی در شبکه بلور و به ازای هر 5×10^7 اتم سیلیسیم، فقط یک اتم 3 ظرفیتی در شبکه بلور وجود دارد. بنابراین هر اتم 5 ظرفیتی مانند (فسفر) در بلور سیلیسیم یک الکترون اضافی ایجاد می‌کند که به نام اتم دهنده نامیده می‌شود و به همین ترتیب یک اتم 3 ظرفیتی مانند (بور) در بلور سیلیسیم یک حفره ایجاد می‌کند که اتم گیرنده نامیده می‌شود. قطعه‌ای از سیلیسیم نوع (n) و نوع (p) از نظر الکتریکی خنثی است.

۲-۱ ناحیه تهی در پیوند pn

در شکل (۲-۱) یک پیوند pn ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ پیوند pn پس از تشکیل شدن

در لحظه تشکیل پیوند الکترون‌هایی که در طول پیوند با سرعت به سمت ناحیه (p) پخش می‌شوند، با حفره‌های اکثریت موجود در ناحیه (p) ترکیب می‌شوند؛ در نتیجه بعضی از حفره‌های اکثریت از بین می‌روند و در نتیجه در ناحیه تماس در سمت (p) بارهای مقید منفی به‌جا می‌مانند. به همین ترتیب حفره‌هایی که در طول پیوند به سرعت به سمت ناحیه (n) پخش می‌شوند، با الکترون‌های اکثریت موجود در ناحیه (n) ترکیب می‌شوند و در ناحیه تماس در سمت (n) بارهای مقید مثبت به‌جا می‌مانند. به این ناحیه که دارای بارهای مقید است ناحیه تهی گفته می‌شود (به شکل (۲-۱) نگاه کنید) و لذا درونی پیوند در ناحیه تهی (دو سر پیوند) عبارت است از:

$$V_0 = V_T \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad (1-1)$$

در برخی از نوشته‌ها به جای V_0 ، از ψ_0 استفاده می‌شود. (۳-۱) رابطه‌ی (۳-۱) را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

n_i : چگالی حامل‌های ذاتی در سیلیسیم است.

N_A و N_D به ترتیب چگالی آلاینده‌های 5 ظرفیتی و 3 ظرفیتی است.

$$V_T = \frac{K}{q} T \quad (۳-۱)$$

V_T : ولتاژ معادل دمایی

$$K: \text{ثابت بولتزمن} \left(\frac{\text{ژول}}{\text{کلوین}} \right) \quad 1.38 \times 10^{-23}$$

$$q: \text{بار الکترون (کولب)} \quad 1.6 \times 10^{-19}$$

$$T: \text{دمای کلوین} \quad 273 + T^{\circ}\text{C}$$

V_T : در دمای اطاق بین 25 تا 26 میلی‌ولت است.

اگر نفوذ ناحیه تپی در ناحیه (P)، W_1 و در ناحیه (n)، W_2 باشد، در این صورت:

$$W_1 \cdot N_A = W_2 \cdot N_D \quad (۳-۱)$$

طبق رابطه (۳-۱) کل بار در واحد سطح هر دو طرف مرز پیوند هم‌اندازه و دارای علامت مخالف هستند.

$$W_1 = \left[\frac{2\varepsilon(V_0)}{q \cdot N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۱)$$

$$W_2 = \left[\frac{2\varepsilon(V_0)}{q \cdot N_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵-۱)$$

و عرض ناحیه تپی مجموع W_1 و W_2 است.

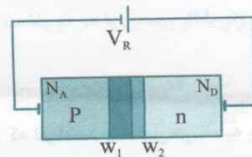
$$W = W_1 + W_2$$

روابط بالا نشان می‌دهند که نفوذ ناحیه تپی در سمت نیمه‌هادی با چگالی آلاینده کمتر، بیشتر است.

$$\varepsilon: \text{ثابت دی‌الکتریک سیلیسیم،} \quad 1.04 \times 10^{-12} \frac{\text{فاراد}}{\text{سانتی‌متر}}$$

۳-۱ پیوند pn تحت بایاس معکوس

در شکل (۳-۱) یک پیوند pn که بایاس معکوس به وسیله منبع ولتاژ V_R دارد، نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ پیوند pn تحت بایاس معکوس

ولتاژ معکوس اعمال شده V_R ، ناحیه تهی را به سمت نواحی (P) و (n) گسترش داده است و w_1 و w_2 افزایش می‌یابند:

$$W_1 = \left[\frac{2\epsilon(V_o + V_R)}{q \cdot N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۶-۱)$$

$$W_2 = \left[\frac{2\epsilon(V_o + V_R)}{q \cdot N_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۷-۱)$$

حداکثر میدان الکتریکی در مرز پیوند عبارت است از:

$$E_{\max} = -\frac{q \cdot N_A \cdot W_1}{\epsilon} \quad (۸-۱)$$

ظرفیت خازنی ایجاد شده پیوند عبارت است از:

$$C_J = A \left[\frac{q \cdot \epsilon \cdot N_A \cdot N_D}{2(N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{V_o + V_R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۹-۱)$$

A: سطح مقطع پیوند

$$C_J = \frac{C_{J_o}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_o}}} \quad (۱۰-۱)$$

C_{J_o} : ظرفیت خازن در حالت $V_R = 0$ ولت است.

مثال ۱: در یک پیوند بایاس معکوس $V_R = 10$ ولت است. اگر $N_A = 10^{15} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ و $N_D = 10^{16} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ باشد،

مقادیر w_1 ، w_2 و E_{\max} عبارت‌اند از:

حل:

با استفاده از روابط (۶-۱) و (۷-۱) و (۸-۱) داریم:

$$W_1 = 3.5 \mu\text{m} \text{ (میکرومتر)}$$

$$W_2 = 0.35 \mu\text{m} \text{ (میکرومتر)}$$

$$E_{\max} = 5.4 \times 10^4 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

دیده می‌شود که نفوذ سد پتانسیل در ناحیه با آلایندگی کم تقریباً ده برابر نفوذ سد پتانسیل در ناحیه با آلایندگی زیاد است. در تمام نیمه‌هادی‌های به‌کاررفته در الکترونیک، پیوندها، آلایندگی با چگالی‌های متفاوت دارند.

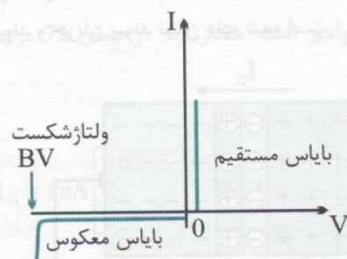
۴-۱ شکست پیوند pn تحت بایاس معکوس

حداکثر میدان الکتریکی در مرز پیوند در حالت بایاس معکوس برای پیوند لبه‌ای عبارت است از:

$$|E_{MAX}| = \sqrt{\frac{2q \cdot N_A \cdot N_D \cdot V_R}{\epsilon(N_A + N_D)}} \quad (11-1)$$

$$|E_{MAX}| = \frac{q \cdot N_A \cdot W_1}{\epsilon} \quad (12-1)$$

در رابطه (۱۱-۱) از V_0 صرف‌نظر شده است. این رابطه نشان می‌دهد که حداکثر میدان الکتریکی با افزایش چگالی ناخالصی و ولتاژ V_R زیاد می‌شود. در پیوندهای واقعی اثرات دیگری نیز وجود دارند که سبب زیاد شدن حداکثر میدان الکتریکی می‌شوند.



شکل ۴-۱ مشخصه ولتاژ - جریان پیوند در بایاس مستقیم و بایاس معکوس

با اعمال بایاس معکوس، از پیوند جریان معکوس کمی می‌گذرد که ناشی از وجود حامل‌های اقلیت است. میدان الکتریکی ایجاد شده سبب عبور این حامل‌ها از ناحیه تهی می‌شوند، در یک پیوند با چگالی ناخالصی‌های مشخص، افزایش بایاس معکوس منجر به افزایش میدان الکتریکی می‌شود که نتیجه آن افزایش انرژی حامل‌ها در برخورد با یون‌های شبکه ناحیه تهی است، این امر زوج الکترون حفره‌های جدیدی را به وجود می‌آورد. با افزایش بیشتر ولتاژ معکوس این روند سریع‌تر می‌شود و جریان نشستی معکوس افزایش ناگهانی خواهد داشت که به صورت افزایش بهمنی است. در ولتاژ معکوس تقریباً شخصی، میدان الکتریکی در حد بحرانی قرار می‌گیرد و پیوند شکسته می‌شود. به این ولتاژ معکوس ولتاژ شکست BV (Break Down Voltage) گفته می‌شود. در این نقطه به شدت افزایش می‌یابد. در شکل (۴-۱) جریانی مشخصه (جریان-ولتاژ) پیوند نشان داده شده است.

ولتاژ شکست معکوس (BV) حوالی ۵ ولت دارای ضریب دمایی حدود صفر و (BV) کمتر از ۵ ولت دارای ضریب دمایی منفی و (BV) بیشتر از حوالی ۵ ولت دارای ضریب دمایی مثبت است.

پیوند pn با اعمال ولتاژ معکوس، در ناحیه شکست معکوس قرار بگیرد، توان تلفاتی پیوند برابر با حاصل ضرب ولتاژ شکست در جریان پیوند است که به صورت گرم شدن پیوند ظاهر می‌شود. وجود مقاومت مناسب در مسیر مدار، می‌تواند جریان را کنترل کند و مانع از تخریب پیوند شود.

پدیده‌هایی که در ناحیه شکست کار می‌کنند به عنوان ولتاژ مرجع به کار می‌روند. این دیودها را دیود زنر می‌نامند (زنر نام شخصی است) پدیده دیگری هم به نام شکست زنری وجود دارد که با شکست بهمنی متفاوت است. شکست بهمنی وقتی رخ می‌دهد که حامل‌های اقلیت تحت تأثیر میدان الکتریکی به اندازه کافی انرژی پیدا می‌کنند که سبب شکستن پیوندهای کووالانسی شوند. حامل‌های آزاد شده حامل‌های دیگری را به وجود می‌آورند که نهایتاً به شکست بهمنی می‌انجامد. درحالی‌که شکست زنر وقتی رخ می‌دهد که میدان الکتریکی به حد بحرانی برسد و بتواند پیوندهای کووالانسی را بشکند و جفت الکترون حفره به وجود آید. این میدان الکتریکی، الکترون‌ها را به سمت (n) و حفره‌ها را به سمت (p) می‌راند. اگر پیوند با ولتاژ معکوس حدود ۶ ولت و تر شکسته شود، مکانیزم مؤثر در شکست، به سبب اثر زنر است، شکست بهمنی معمولاً بیشتر از ۷ ولت است. در پیوندهایی شکست معکوس بین حوالی ۵ ولت تا ۷ ولت باشد، مکانیزم مؤثر ممکن است اثر زنر یا اثر بهمنی یا هر دو باشند.

۲. چگالی ناخالصی در یک پیوند pn صفحه‌ای، $N_A = 10^{15} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ و $N_D = 10^{16} \frac{\text{اتم}}{\text{cm}^3}$ است اگر شکست پیوند

در میدان الکتریکی بحرانی برابر با $E = 5 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$ باشد، ولتاژ شکست پیوند pn را مشخص کنید.

حل:

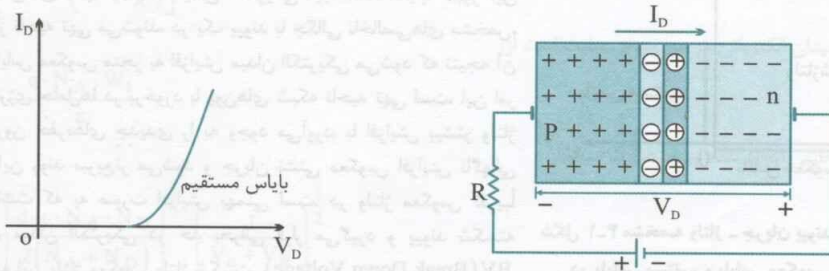
اگر در رابطه (۱۱-۱) به جای V_R ، BV قرار داده شود، ولتاژ شکست به دست می‌آید:

$$BV = \frac{\epsilon(N_A + N_D)E^2}{2qNA \cdot ND}$$

$$BV = \frac{1.04 \times 10^{-12} \times 1.1 \times 10^{15}}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 10^{15}} \times 25 \times 10^{10} = 90 \text{ (ولت)}$$

۵-۱ پیوند pn تحت بایاس مستقیم

در شکل (۵-۱) یک پیوند pn با اعمال ولتاژ مستقیم (بایاس مستقیم) و در شکل (۶-۱) منحنی مشخصه $(V-I)$ ولتاژ دو سر پیوند و جریان پیوند نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ پیوند pn: بایاس مستقیم

شکل ۶-۱ مشخصه $(V-I)$ پیوند pn: بایاس مستقیم

در شرایط بایاس مستقیم، لایه تهی باریک‌تر می‌شود و ولتاژ سد پتانسیل کاهش می‌یابد، در نتیجه حفره‌های بیشتری از ماده (p) از لایه تهی می‌گذرد و جریان I_D افزایش می‌یابد. حفره‌های وارد شده به ناحیه (n) غلظت حامل اقلیت در ناحیه (n) را افزایش می‌دهند، به طوری که از غلظت حالت تعادل (p_{n0}) بیشتر می‌شود. تفاوت غلظت حامل‌های (p) تزریق شده (p_n) و (p_{n0}) که غلظت اضافی است در نزدیکی لایه تهی بیشترین مقدار را دارد. این تفاوت با دور شدن از این لایه به طور نمایی کاهش می‌یابد و سرانجام به صفر می‌رسد. همین روند برای الکترون‌های اقلیت موجود در ماده (p) هم وجود دارد. در لایه تهی در سمت ماده (p) هم $(n_p - np_0)$ حداکثر است و به طور نمایی با دور شدن از لایه تهی کمتر می‌شود و به صفر می‌رسد. این روند، جریان I_D را به بیشتر از I_g ارتقا می‌دهد.

اگر طول پخش حفره‌ها در ماده نوع (n)، L_p اسم گذاری شود، آن‌گاه:

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (13-1)$$

D_p : ثابت پخش حفره‌ها در سیلیسیم نوع (n) است.

τ_p : عمر حامل اقلیت اضافی در سیلیسیم نوع (n) است.

و به همین ترتیب L_n عبارت است از:

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (14-1)$$

جریان کل عبوری (I_D) از پیوند عبارت است از:

$$I_D = A \cdot q \cdot n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_D} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_A} \right) \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (15-1)$$

$$I_S = Aq \cdot n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_D} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_A} \right) \quad (16-1)$$

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (17-1)$$

طبق رابطه (16-1)، جریان I_S (جریان اشباع معکوس) با سطح مقطع پیوند A متناسب است. چون I_S با n_i^2 نسبت مستقیم دارد و n_i با افزایش دما زیاد می‌شود؛ بنابراین I_S با افزایش دما به سرعت زیاد می‌شود و در نتیجه (I_D) با افزایش دما افزایش می‌یابد. به ازای هر 5 درجه سانتی‌گراد افزایش دما، I_S تقریباً دو برابر می‌شود.

مثال ۳: در یک پیوند، مقدار I_S در دمای 25 درجه سانتی‌گراد برابر با یک نانوآمپر است. مقدار I_S در دمای 75 درجه سانتی‌گراد چقدر می‌شود؟

حل:

$$I_S = 1 \text{ nA} \left[2^{\frac{75-25}{5}} \right] = 1.024 \mu\text{A} \approx 1 \text{ میکروآمپر}$$

ظرفیت خازنی پیوند در بایاس مستقیم برای جریان‌های مستقیم کوچک تقریباً برابر است با:

$$C_J = \frac{C_{J_0}}{\sqrt{1 - \frac{V_D}{V_0}}} \quad (18-1)$$

رابطه (18-1) مانند رابطه (10-1) با تفاوت علامت منفی داخل رادیکال است.

۶-۱ دیود (DIODE)

دیودها در مدارهای الکترونیکی و الکترونیک صنعتی، کاربرد وسیعی دارند که هم در بایاس مستقیم و هم در بایاس معکوس به کار می‌روند. جریان دیود در حالت بایاس مستقیم عبارت است از:

$$I_D = I_S \left[\exp \frac{V_D}{n \cdot V_T} - 1 \right] = I_S \left[e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right] \quad (19-1)$$

طبق رابطه (16-1) I_S متناسب با سطح مقطع A و n_i^2 است:

$$V_T = \frac{k}{q} (273^\circ + T^\circ\text{C}) \quad (20-1)$$

در محاسبات معمولی V_T حوالی 25 میلی‌ولت منظور می‌شود.

ضریب n برای دیودهای سیلیسیم بین 1 الی 2 است که تابع ساخت دیود است. غالباً $n = 1$ برای سهولت محاسبات منظور می‌شود.

در جریان‌های I_D که خیلی بیشتر از I_S باشد، جریان دیود تقریباً برابر است با:

$$I_D = I_S \left(\exp \frac{V_D}{nV_T} \right) = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad (21-1)$$

$$V_D = n v_T \cdot L_n \left(\frac{I_D}{I_S} \right) \quad (22-1)$$

$$V_D = V_T L_n \frac{I_D}{I_S} \quad (23-1)$$

$$V_D = 60(\text{mV}) \log \frac{I_D}{I_S} \quad (24-1)$$

مثال ۴: در یک دیود $n=1$ و $I_S = 10^{-13}$ آمپر است. ولتاژ دو سر دیود در جریان‌های مستقیم 1 و 10 و 100 میلی‌آمپر چقدر است؟

حل:

به ازای جریان 1 mA:

$$V_D = (60 \text{ mV}) \log \frac{1 \text{ mA}}{10^{-13} \text{ A}} = 600 \text{ mV}$$

به ازای جریان (10 mA):

$$V_D = (60 \text{ mV}) \log \frac{10 \text{ mA}}{10^{-13} \text{ A}} = 660 \text{ mV}$$

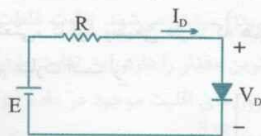
به ازای جریان 100 میلی‌آمپر:

$$V_D = (60 \text{ mV}) \log \frac{100 \text{ mA}}{10^{-13} \text{ A}} = 720 \text{ mV}$$

غالباً در محاسبات سریع و معمولی، ولتاژ دیود تقریباً 0.6 یا 0.7 ولت منظور می‌شود.

۷-۱ مدل DC و مدل AC دیود

مدار دیودی شکل (۷-۱) با منبع ولتاژ E (بایاس مستقیم) نشان داده شده است:



شکل ۷-۱ مدار ساده دیودی بایاس مستقیم

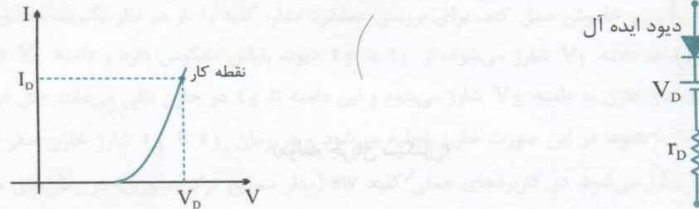
$$I_D = \frac{E - V_D}{R} \quad (25-1)$$

$$I_D = \frac{E - n v_T L_n \frac{I_D}{I_S}}{R} \quad (26-1)$$

محاسبه I_D با روش تکرار از رابطه (۲۶-۱) امکان‌پذیر ولی مستلزم وقت زیادی است. در محاسبات سریع غالباً ولتاژ دو سر دیود سیلیکونی حدود 0.6 تا 0.7 ولت منظور می‌شود، در این صورت جریان I_D از رابطه (۲۶-۱) عبارت است از:

$$I_D \approx \frac{E - 0.6}{R} \quad \text{یا} \quad I_D \approx \frac{E - 0.7}{R}$$

در شکل (۸-۱) مدل دیود و منحنی مشخصه دیود رسم شده است.



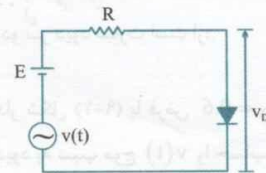
شکل ۸-۱ الف) مدل دیود، ب) منحنی مشخصه دیود در بایاس مستقیم

اگر در مدار شکل (۷-۱) مدار معادل شکل (۸-۱) الف جانشین شود، آن گاه:

$$I_D = \frac{E - V_D}{R + r_D} \quad (27-1)$$

مقاومت r_D عبارت است از $\frac{V_D}{I_D}$ که از مشخصات دیود با شماره معینی از برگه اطلاعات آن قابل استخراج است. در بسیاری از محاسبات از r_D صرف نظر می شود. در برخی از محاسبات در صورت امکان، می توان دیود را ایده آل فرض کرد و از V_D هم صرف نظر کرد.

در شکل (۹-۱) مدار دیود که به وسیله ولتاژ E در بایاس مستقیم قرار دارد، نشان داده شده است. به این مدار موج $v(t)$ اعمال شده است.



شکل ۹-۱ مدار دیودی بایاس مستقیم با سیگنال $v(t)$

جریان عبوری از دیود به سبب جریان بایاس مستقیم و جریان سیگنال ورودی عبارت است از:

$$i_D = I_S \cdot e^{\frac{v_D}{nV_T}} \quad (28-1)$$

$$v_D = V_D + v_d(t) \quad (29-1)$$

$$i_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D + v_d(t)}{nV_T}} \quad (30-1)$$

$$i_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \cdot e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}} \quad (31-1)$$

$$i_D = I_D \cdot e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}} \quad (32-1)$$

در رابطه (۳۲-۱) I_D جریان بایاس مستقیم دیود است که ناشی از پتانسیل E است، اگر در رابطه نمایی (۳۲-۱)، $V_d \ll nV_T$ باشد، در این صورت رابطه نمایی (۳۲-۱) به رابطه خطی (۳۳-۱) قابل تبدیل است:

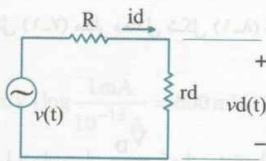
$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots$$

$$i_D = I_D \left(1 + \frac{V_d(t)}{nV_T} \right) \quad (33-1)$$

$$i_D = I_D + I_D \frac{V_d(t)}{nV_T} \quad (34-1)$$

$$i_d = \frac{I_D}{nV_T} \cdot V_d(t) \quad (\text{مؤلفه جریان سیگنال}) \quad (35-1)$$

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} \quad (36-1)$$



r_d مقاومت دینامیکی دیود در جریان نقطه کار I_D است. با توجه به رابطه (۳۵-۱) و (۳۶-۱) می‌توان شکل (۱۰-۱) را به عنوان مدل سیگنال کوچک مدار شکل (۹-۱) در نظر گرفت.

شکل ۱۰-۱ مدل سیگنال کوچک مدار شکل (۹-۱)

$$i_d(t) = \frac{v(t)}{r_d + R} \quad (37-1)$$

و ولتاژ سیگنال دو سر دیود عبارت است از:

$$v_d(t) = r_d \cdot i_d(t) \quad (38-1)$$

مثال ۵: در مدار شکل (۹-۱) با فرض $V_D = 0.6$ ولت و $E = 10.6$ ولت و $R = 1k\Omega$ و $n=1$ و $V(t) = 4(mV)\sin\omega t$ ولتاژ دوسر دیود به سبب موج $v(t)$ را حساب کنید ($V_T = 25mV$)

حل:

$$I_D = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10.6 - 0.6}{1k} = 10mA$$

جریان بایاس عبارت است از:

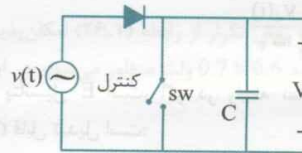
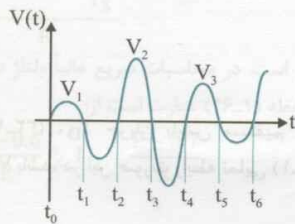
$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = 2.5\Omega$$

$$V_d(t) = \frac{V(t)}{R + r_d} \cdot r_d = \frac{4(mV)\sin\omega t}{1k\Omega + 2.5\Omega} (2.5\Omega)$$

$$V_d(t) = 0.01 \sin\omega t \quad (v)$$

۸-۱ مدار آشکارساز قله

در شکل (۱۱-۱) مدار ساده آشکارساز قله نشان داده شده است.

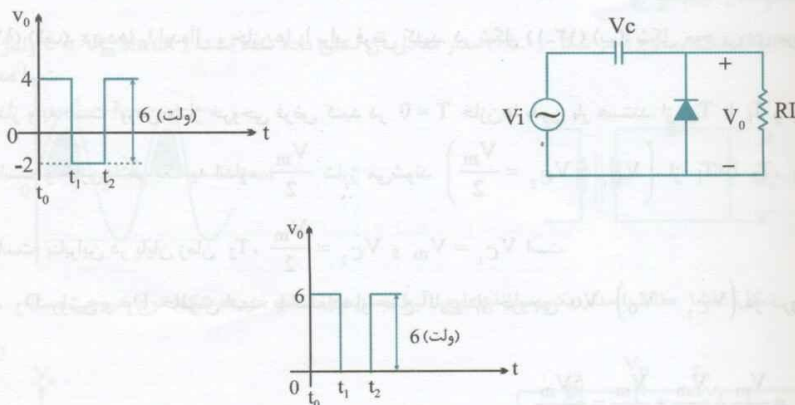


شکل ۱۱-۱ الف: مدار آشکارساز قله (ب): شکل موج اعمال شده

در مدار شکل (۱۱-۱) (الف) دیود را ایده‌آل فرض کنید. کلید (sw) یک نوع مدار ترانزیستوری است که با اعمال ولتاژ کنترل می‌تواند به صورت کلید روشن و خاموش عمل کند. برای بررسی عملکرد مدار، کلید را باز در نظر بگیرید. مطابق شکل (۱۱-۱) (ب) از t_0 تا t_1 خازن C به دامنه V_1 شارژ می‌شود، از t_1 تا t_2 دیود، بایاس معکوس دارد و دامنه V_1 در خازن ذخیره شده است. از t_2 تا t_3 ولتاژ خازن به دامنه V_2 شارژ می‌شود و این دامنه تا t_6 در خازن باقی می‌ماند. حال فرض کنید کلید در t_3 بسته شده و مجدداً باز شود. در این صورت خازن تخلیه می‌شود و در زمان t_3 تا t_4 شارژ خازن صفر است. از t_4 تا t_5 خازن به دامنه V_3 شارژ می‌شود. در کاربردهای عملی کلید SW (مدار سوئیچ ترانزیستوری) در زمان‌های معینی روشن و خاموش می‌شود تا آشکارسازی قله در زمان‌های خواسته‌شده مشخص شود.

۹-۱ باز ذخیره‌کننده dc

در شکل (۱۲-۱) مدار باز ذخیره‌کننده dc با ولتاژ ورودی مربعی شکل و موج خروجی نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۱ (الف) مدار باز ذخیره‌کننده dc، (ب): موج ورودی با دامنه قله تا قله ۶ ولت،

(ج) شکل موج خروجی با دامنه (+6) ولت ($R_L = \infty$)

در مدار شکل (۱۲-۱) با توجه به جهت دیود، خازن به (+2) ولت (سیکل منفی) شارژ می‌شود و این شارژ را در خود نگه می‌دارد و از آن پس دیود خاموش می‌ماند.

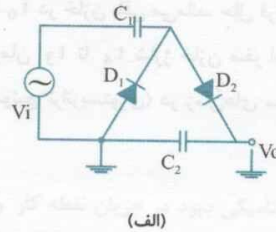
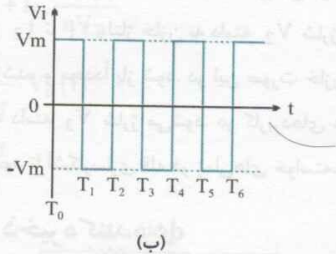
$$V_0 = V_i + V_C$$

$$V_0 = 4 + 2 = 6V$$

بنابراین ولتاژ خروجی بالای خط صفر و با دامنه 6 ولت مطابق شکل (۱۲-۱) (ج) تشکیل می‌شود. البته موضوع اخیر با مقاومت بار بی‌نهایت صادق است. هرگاه RL محدود باشد، چون از RL جریان می‌گذرد، پس ولتاژ خروجی تقریباً به اندازه ولتاژ دیودی از زیر خط صفر به بالا می‌رود. در مدارهای دقیق به‌جای دیود تنها، از مدارهای دیود و آپ‌امپ استفاده می‌شود تا ولتاژ آستانه دیود به سمت صفر میل کند.

۱۰-۱ مدار دو برابر کننده و چند برابر کننده ولتاژ

در شکل (۱۳-۱) مدار دو برابر کننده ولتاژ نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۱ (الف) مدار دو برابر کننده ولتاژ، (ب) شکل موج ورودی ($C_1 = C_2$)

در شکل (۱۳-۱) (الف)، دیودها را ایده آل و خازن‌ها را برابر فرض کنید. در شکل (۱۳-۱) (ب)، شکل موج ورودی مربعی با دامنه V_m فرض شده است.

برای تحلیل مدار و به دست آوردن ولتاژ خروجی فرض کنید در $T=0$ خازن‌ها بدون بار هستند. از T_0 تا T_1 و D_2 روشن و D_1 خاموش است و خازن‌ها هر یک به اندازه $\frac{V_m}{2}$ شارژ می‌شوند ($V_{C_1} = V_{C_2} = \frac{V_m}{2}$)، از T_1 تا T_2 ، D_1 روشن و

D_2 خاموش است؛ بنابراین در پایان زمان T_2 ، $V_{C_2} = \frac{V_m}{2}$ و $V_{C_1} = V_m$ است.

از T_2 تا T_3 ، D_2 روشن و D_1 خاموش است. با استفاده از جمع آثار ولتاژ خروجی V_o ($V_{C_2} = V_o$) در شروع زمان T_3 عبارت است از:

$$V_o = V_{C_2} = \frac{V_m}{4} + \frac{V_m}{2} + \frac{V_m}{2} = \frac{5V_m}{4}$$

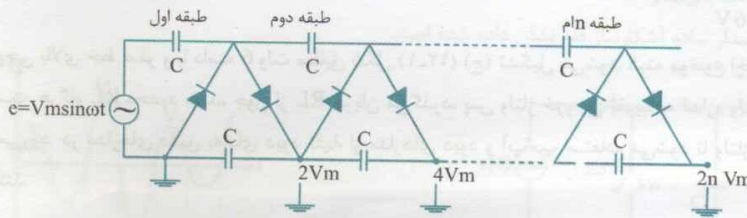
در پایان زمان T_4 ، $V_{C_2} = \frac{5V_m}{4}$ و $V_{C_1} = V_m$ است.

در شروع زمان T_5 ، با استفاده از جمع آثار داریم:

$$V_o = V_{C_2} = \frac{5V_m}{8} + \frac{V_m}{2} + \frac{V_m}{2} = \frac{13V_m}{8}$$

و بالاخره در پایان سیکل n ام، $V_{C_2} = 2V_m$ است.

شکل (۱۴-۱) مدار چند برابر کننده ولتاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴-۱ چندبرابر کننده ولتاژ

اگر $e = V_m \sin \omega t$ باشد، طبق بحث مدار دو برابرکننده ولتاژ، ولتاژ طبقه n ام برابر $2nV_m$ خواهد شد. گرچه بحث چند برابرکننده با مقدار $2nV_m$ در حالی صادق است که جریان بار بسیار کم باشد. درحالی که وجود جریان بار، ایجاد جریان A_C در خازن‌ها می‌کند که سبب افت ولتاژ در خروجی می‌شود. درحقیقت تعداد بیشتر از 20 طبقه عملی نیست. می‌توان ثابت کرد که افت ولتاژ خروجی ΔV عبارت است از:

$$\Delta V = \frac{i}{FC} \left[\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{1}{6} n \right] \quad (39-1)$$

I: جریان خروجی (جریان بار)

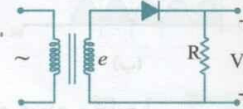
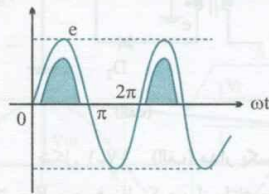
F: فرکانس ولتاژ ورودی

C: ظرفیت خازن

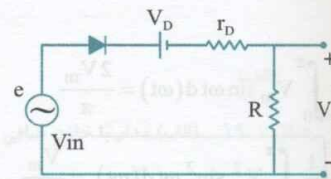
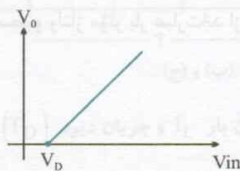
n: تعداد طبقات

۱۱-۱ یکسوساز نیم‌موج

در شکل (۱۵-۱) یکسوساز نیم‌موج و در شکل (۱۶-۱) مدار معادل آن نشان داده شده است. ($e = V_m \sin \omega t$ ولتاژ ثانویه)



شکل ۱۵-۱ (الف) مدار یکسوساز نیم‌موج، (ب) بخش‌های هاشورخورده شکل موج خروجی است



شکل ۱۶-۱ (الف) مدار معادل مربوط به شکل (۱۵-۱) و (ب) منحنی $(V_0 - V_{iN})$

در مدار شکل (۱۵-۱) پس از آنکه دامنه ولتاژ ورودی از ولتاژ آستانه هدایت دیود بیشتر شود، دیود هدایت می‌کند. بنابراین دیود در سیکل مثبت کمتر از 180 درجه هدایت می‌کند. در سیکل منفی دیود خاموش می‌ماند. اگر زاویه شروع هدایت دیود θ نام‌گذاری شود، آن‌گاه:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{V_D}{V_m} \quad (40-1)$$

و زاویه خاموش شدن دیود عبارت است از: $(\pi - \theta)$ و اندازه هدایت عبارت است از: $(\gamma = \pi - 2\theta)$

ولتاژ خروجی در نیم‌سیکل مثبت با توجه به شکل (۱۶-۱) (الف)، عبارت است از:

$$(e = V_m \sin \omega t) \quad \text{(ولتاژ ورودی)}$$

$$V_0 = e \frac{R}{R + r_D} - V_D \frac{R}{R + r_D} \quad (41-1)$$

معمولاً $r_D \ll R$ است. اگر دامنه e خیلی بزرگتر از V_D باشد، می‌توان تمام‌سیکل مثبت را در خروجی منظور کرد و ولتاژ خروجی به صورت نیم‌سینوسی بالای خط صفر است. با تعویض جهت دیود، فقط نیم‌سیکل‌های منفی در خروجی وجود دارند. مقادیر ولتاژ متوسط و ولتاژ مؤثر خروجی عبارت‌اند از:

$$V_{o\text{dc}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} \quad (42-1)$$

$$V_{o(\text{rms})} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{V_m}{2} \quad (43-1)$$

۱۲-۱ یکسوساز تمام‌موج

در شکل (۱۷-۱) مدار یکسوساز تمام‌موج با دو دیود و ترانسفورماتور با سر وسط نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۱ (الف) مدار یکسوساز تمام‌موج، (ب) شکل موج‌های ورودی و خروجی

با فرض $R_L \gg r_D$ و صرف‌نظر کردن از ولتاژ V_D ، هدایت D_1 سیکل مثبت و هدایت D_2 سیکل منفی را در بالای خط صفر خروجی ظاهر می‌کند:

$$e = V_m \sin \omega t$$

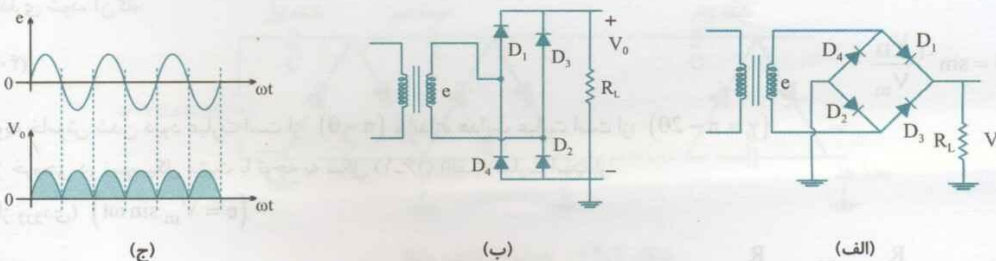
مقادیر ولتاژ متوسط و ولتاژ مؤثر بار عبارت‌اند از:

$$V_{\text{dc}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \quad (44-1)$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (45-1)$$

در نیم‌سیکل مثبت که D_2 خاموش است، حداکثر ولتاژ دو سر D_2 برابر با $2V_m$ است، به همین ترتیب در نیم‌سیکل منفی که D_1 خاموش است، حداکثر ولتاژ دو سر D_1 برابر $2V_m$ است.

در شکل (۱۸-۱) مدار یکسوساز تمام‌موج ۴ دیودی که به نام یکسوساز پل شناخته می‌شود، نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۱ (الف) و (ب) مدار یکسوساز پل با دو شکل ترسیمی، (ج) شکل موج‌های ورودی و خروجی

در شکل‌های (۱۸-۱) الف) و (۱۸-۱) ب) در نیم‌سیکل‌های مثبت D_1 و D_2 و در نیم‌سیکل‌های منفی D_4 و D_3 هدایت می‌کنند و ولتاژ خروجی یکسوسوده بالای خط صفر ایجاد می‌شود:

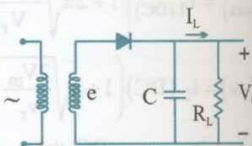
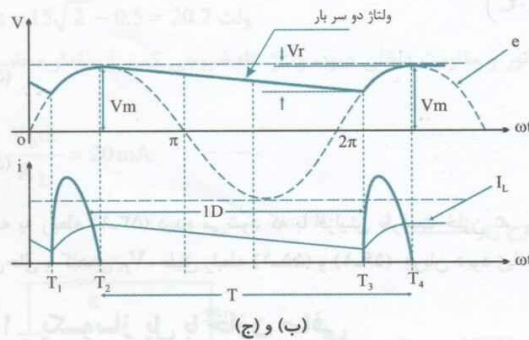
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

حداکثر ولتاژ معکوس دوسر هر دیود خاموش برابر با V_m است. در مدار یکسوساز تمام‌موج با ترانسفورماتور سر وسط‌دار، جریان DC که از هر ثانویه ترانسفورماتور می‌گذرد برابر با $\frac{V_m}{\pi \cdot R_L}$ است؛ بنابراین توان DC در هر ثانویه سبب داغ شدن هسته ترانسفورماتور می‌شود. درحالی‌که در یکسوساز پل جریان DC در ثانویه ترانسفورماتور برابر صفر است. رایج‌ترین یکسوسازها در صنعت، یکسوساز پل (تمام‌موج) است که به صورت یک‌فاز و سه‌فاز به کار می‌روند.

۱۳-۱ یکسوساز نیم‌موج با خازن صافی

در شکل (۱۹-۱) یکسوساز نیم‌موج با خازن C نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۱ الف) مدار با خازن صافی C، ب) ولتاژ بار، ج) جریان بار I_L و جریان دیود (I_D)

با توجه به شکل (۱۹-۱) در نیم‌سیکل مثبت دیود از T_1 تا T_2 هدایت می‌کند و خازن به V_m شارژ می‌شود. در این حالت ولتاژ دو سر بار در T_2 برابر با V_m است. (دیود ایده‌آل فرض شده است) از T_2 تا T_3 دیود خاموش است و بار موجود در خازن C، در مقاومت بار R_L شروع به تخلیه شدن می‌کند. از T_3 تا T_4 دیود دوباره بایاس مستقیم می‌شود و هدایت می‌کند و در T_4 دامنه ولتاژ خروجی به V_m می‌رسد. دیده می‌شود که ولتاژ دو سر بار دارای دندان‌ه (ریپل) است. دامنه این دندان‌ها یا ولتاژ ریپل (Ripple Voltage) با V_r نشان داده شده است. میانگین ولتاژ روی بار R_L ، V_{dc} برابر است با:

$$V_{dc} = V_m - \frac{1}{2} V_r \quad (46-1)$$

ولتاژ دو سر بار در زمان خاموشی دیود عبارت است از:

$$V_o = V_m e^{-\frac{T}{R_L C}} \quad (47-1)$$

در پایان زمان تخلیه (شروع هدایت دیود)؛ یعنی T_3 ، V_o برابر است با:

$$V_o = V_m - V_r \quad (48-1)$$

$$V_m - V_r \approx V_m e^{-\frac{T}{R_L \cdot C}} \quad (49-1)$$

$$V_r = V_m \left(1 - e^{-\frac{T}{R_L \cdot C}} \right) \quad (50-1)$$

اگر $T \ll R_L C$ باشد (همواره چنین است) در این صورت:

$$e^{-\frac{T}{R_L \cdot C}} \approx 1 - \frac{T}{R_L \cdot C} \quad (51-1)$$

$$V_r \approx V_m \frac{T}{R_L \cdot C} \quad (52-1)$$

$$V_r \approx \frac{V_m}{f \cdot R_L \cdot C} \quad (53-1)$$

$$V_{o(DC)} \approx V_m - \frac{V_m}{2f \cdot R_L \cdot C} = V_m \left(1 - \frac{1}{2f \cdot R_L \cdot C} \right) \quad (54-1)$$

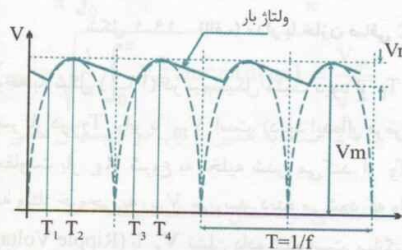
$$I_{D(max)} = I_{L(DC)} \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{2V_m}{V_r}} \right) \quad (55-1)$$

$$I_D(av) \approx I_L(DC) \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_m}{V_r}} \right) \quad (56-1)$$

با توجه به رابطه (۵۳-۱) دیده می‌شود که با افزایش ظرفیت خازن C ، کاهش می‌یابد و ولتاژ DC خروجی صاف‌تر می‌شود. درعین حال با کاهش V_r ، طبق رابطه (۵۵-۱) و (۵۶-۱) جریان دیود زیاد می‌شود و دیود باید بتواند این جریان را تحمل کند.

۱۴-۱ یکسوساز پل با خازن صافی

اگر به دو سر R_L در یکسوساز شکل (۱۸-۱) خازن C وصل شود، شکل موج دو سر بار را می‌توان مطابق شکل (۲۰-۱) نشان داد.



شکل ۲۰-۱ شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز تمام‌موج با خازن صافی C

چون در خروجی یکسوساز تمام‌موج، فرکانس ریپل دو برابر یکسوساز نیم‌موج است، بنابراین:

$$V_r = \frac{V_m}{R_L \cdot C} \cdot \frac{T}{2} \quad (57-1)$$

$$V_r = \frac{V_m}{R_L \cdot C} \cdot \frac{1}{2f} \quad (58-1)$$

$$V_{o\text{dc}} = V_m - \frac{V_r}{2} \quad (59-1)$$

$$I_{D(\text{max})} = I_L \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{V_m}{2V_r}} \right) \quad (60-1)$$

۱۵-۱ حل تعدادی مسئله نمونه

مثال ۶: در یکسوساز پل شکل (۱۸-۱) با خازن C دو سر بار، $R_L = 1\text{k}\Omega$ و ولتاژ ثانویه مؤثر ۱۵ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز است. برای آنکه V_r حداکثر یک ولت باشد، مقدار خازن لازم چقدر است؟ (دیود ایده‌آل فرض شود)

حل:

$$V_r = \frac{V_m}{R_L \cdot C} \cdot \frac{1}{2f}$$

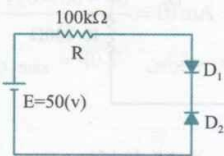
$$C = \frac{15\sqrt{2}}{1000 \times 1} \times \frac{1}{100} = 212 \mu\text{F} \text{ (میکروفاراد)}$$

$$V_{o\text{dc}} = 15\sqrt{2} - 0.5 = 20.7 \text{ ولت}$$

با منظور کردن ولتاژ دیود و مقاومت داخلی ترانسفورماتور و مقاومت داخلی دیود، ولتاژ V_r کمتر از مقدار محاسبه شده است:

$$I_L = \frac{V_{o\text{dc}}}{R_L} = 20 \text{ mA}$$

مثال ۷: در مدار شکل (۲۱-۱) مشخصات دیودها به شرح زیر هستند:



$$V_R = B_V = 100 \text{ V}, \quad I_S = 10^{-13} \text{ A}, \quad n = 1, \quad V_T = 26 \text{ mV}$$

ولتاژ دو سر هر دیود را مشخص کنید.

شکل ۲۱-۱

حل:

چون $E < V_R$ است، در نتیجه جریان مدار نمی‌تواند از I_S بیشتر باشد. دیود D_2 در حالت بایاس معکوس وصل شده است:

$$E = I_S \cdot R + V_{D_1} + V_{D_2}$$

$$I_{D_1} = I_S = I_S \left[e^{\frac{V_{D_1}}{nV_T}} - 1 \right]$$

$$\frac{V_{D_1}}{nV_T} = 2$$

$$V_{D_1} = 18 \text{ mV}$$

$$V_{D_2} = 50 \text{ V}$$

مثال ۸: اگر در مثال (۷)، $E = 100.7$ ولت و $R = 0$ باشد، توان تلفاتی D_1 و D_2 را به دست آورید. ($V_{D_1} = 0.7$ ولت فرض می‌شود)

حل:

$$V_{D_1} = 0.7 \quad , \quad V_{D_2} = 100(V)$$

$$I_{D_1} = I_S \left(e^{\frac{700\text{mV}}{26\text{mV}}} - 1 \right) \approx 50\text{mA}$$

$$P_{D_1} = V_{D_1} (I_{D_1}) = 35(\text{mW})$$

$$P_{D_2} = V_{D_2} (I_{D_2}) = 5(\text{W})$$

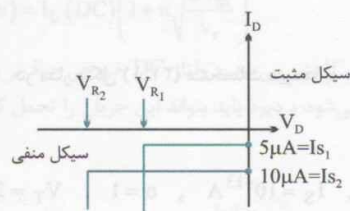
هرگاه دیود D_2 توانایی این تلفات گرمایی را نداشته باشد، می‌سوزد.

مثال ۹: در مدار شکل (۲۲-۱) با توجه به مشخصات دیودها، حداکثر ولتاژ معکوس دو سر D_1 و D_2 را مشخص کنید.

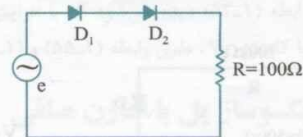
$$D_1 (V_{R_1} = 50\text{V} \quad , \quad I_{S_1} = 5\mu\text{A})$$

$$D_2 (V_{R_2} = 60\text{V} \quad , \quad I_{S_2} = 10\mu\text{A})$$

ولت $[e = 90 \sin \omega t]$



شکل ۲۳-۱



شکل ۲۲-۱

حل:

قله ولتاژ ۹۰ ولت است. در سیکل مثبت ورودی، دیودها در بایاس مستقیم هستند و قله جریان مدار تقریباً برابر است با:

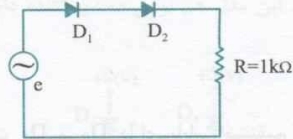
$$I_{\text{max}} = \frac{90 - 2 \times 0.6}{100\Omega} \approx 0.9 \text{ Amp}$$

در سیکل منفی ولتاژ ۹۰ ولتی به مجموع $V_{R_1} + V_{R_2} = 110$ ولت نمی‌رسد. با توجه به شکل (۲۳-۱) جریان

از مدار می‌گذرد، این جریان منحنی مشخصه معکوس D_1 را در ناحیه شکست قطع کرده است؛ بنابراین

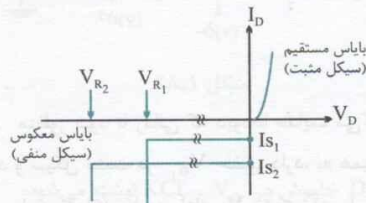
$V_{D_1} = 50$ ولت است اگر از افت ولتاژ روی مقاومت R صرف‌نظر شود، آن‌گاه:

$$V_{D_2} = 90 - 50 = 40$$



شکل ۲۴-۱

مثال ۱۰: در مدار شکل (۲۴-۱) با توجه به مشخصات دیودها جریان مدار و حداکثر ولتاژ معکوس دو سر هر دیود را به دست آورید.



شکل ۲۵-۱

$$D_1 (V_{R_1} = 40V, I_{S_1} = 5\mu A)$$

$$D_2 (V_{R_2} = 60V, I_{S_2} = 10\mu A)$$

$$[e = 110 \sin \omega t] \text{ ولت}$$

حل:

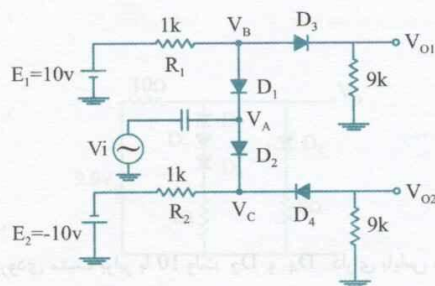
حداکثر جریان مدار در سیکل مثبت ورودی عبارت است از:

$$I_D = \frac{110 - 2V_D}{1k\Omega} = 110 \text{ mA}$$

$$I_R = \frac{110 - 60 - 40}{1k} = 10 \text{ mA}$$

جریان معکوس ۱۰ میلی‌آمپر منحنی معکوس D_1 و D_2 را قطع کرده است؛ بنابراین $V_{D_1 \max} = 40V$ و $V_{D_2 \max} = 60V$ است.

حداکثر جریان معکوس در نیم‌سیکل منفی عبارت است از:



شکل ۲۶-۱

مثال ۱۱: در مدار شکل (۲۶-۱) با فرض دیودهای ایده‌آل ($V_D = 0$)، موج ورودی داده‌شده به صورت $V_i = V_m \sin \omega t$ است، دامنه V_m را برای داشتن V_{O_1} و V_{O_2} با قله‌های بریده‌نشده تعیین کنید.

حل:

خازن در حالت DC باز و در ac اتصال کوتاه است. با فرض باز بودن D_1 و D_2 :

$$V_B = \frac{10}{1k+9k} \cdot 9k = 9(V)$$

$$V_C = \frac{-10}{1k+9k} \cdot 9k = -9(V)$$

در این صورت D_1 و D_2 دارای بایاس مستقیم هستند و هدایت می‌کنند. با وجود تقارن مدار $V_A = 0$ ولت است. با فرض دیودهای ایده‌آل ولتاژ DC در V_{O1} و V_{O2} نیز صفر ولت است. جریان بایاس D_1 و D_2 برابر است با:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{10 - (-10) - 2V_D}{1k + 1k} \approx 10 \text{ mA}$$

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} \approx \frac{25 \text{ mV}}{10 \text{ mA}} \approx 2.5 \Omega$$

اگر $r_d = 0$ منظور شود تا زمانی که دیودها هدایت می‌کنند موج V_i در گره B و گره C وجود دارد. سیکل مثبت D_3 را هادی می‌کند و سیکل مثبت در V_{O1} حضور دارد، به همین ترتیب در سیکل منفی D_4 هدایت می‌کند و سیکل‌های منفی در V_{O2} حضور دارند. حداکثر دامنه ولتاژ V_i مثبت وقتی است که D_1 خاموش شود؛ بنابراین:

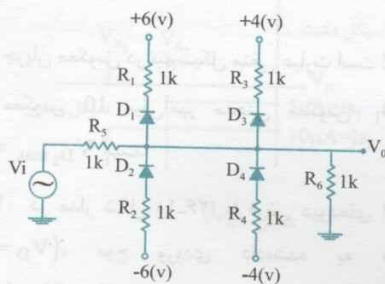
$$\hat{V}_{O+} = +9V$$

و حداکثر دامنه ورودی منفی وقتی است که D_2 خاموش شود:

$$\hat{V}_{O-} = -9V$$

با تغییر مقادیر R_1 و R_2 می‌توان حداکثر دامنه ولتاژهای V_{O1} و V_{O2} را تنظیم کرد؛ بنابراین مدار بالا نوعی محدودکننده دامنه خروجی است.

مثال ۱۲: در مدار (۲۷-۱)، با فرض دیودهای ایده‌آل ($V_D = 0$) و موج ورودی V_i به صورت مربعی شکل با دامنه ± 10 ولت، موج خروجی V_o را تعیین کنید.



شکل ۲۷-۱

حل:

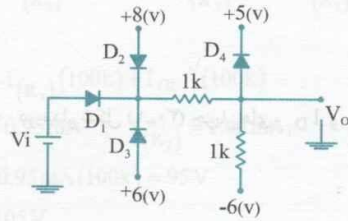
در ورودی مثبت برابر با 10 ولت D_2 و D_4 دارای بایاس معکوس هستند، درحالی‌که D_1 و D_3 دارای بایاس مستقیم هستند. برای تعیین دامنه خروجی، در V_o معادله KCL نوشته می‌شود:

$$\frac{V_o - V_i}{R_5} + \frac{V_o}{R_6} + \frac{V_o - 4}{R_3} + \frac{V_o - 6}{R_1} = 0 \Rightarrow V_o = 5 \text{ ولت}$$

در این صورت D_1 خاموش است و KCL مجدداً در V_o را مشخص می‌کند:

$$\frac{V_o - V_i}{R_5} + \frac{V_o}{R_6} + \frac{V_o - 4}{R_3} = 0 \Rightarrow V_o = 4.66 \text{ ولت}$$

با توجه به تقارن‌ها برای سیکل منفی ورودی، $V_o = -4.66$ ولت خواهد شد. این مدار هم نوعی محدودکننده دامنه خروجی است که با تغییر منابع تغذیه یا مقاومت‌ها قابل تنظیم است.



شکل ۲۸-۱

مثال ۱۳: در مدار شکل (۲۸-۱) با فرض دیود ایده‌آل، ولتاژ خروجی را به ازای $V_i = +2$ ولت و $V_i = +12$ ولت و $V_i = +18$ ولت به دست آورید.

حل: در این صورت $V_o = 1$ ولت است. با فرض D_4 خاموش در V_o ، KCL نوشته می‌شود:

$$\frac{V_o - 8}{1k} + \frac{V_o - (-6)}{1k} = 0 \Rightarrow V_o = 1 \text{ ولت}$$

در این صورت D_4 خاموش و $V_o = 1$ ولت است. در $V_i = +12$ ولت، D_1 روشن و D_2 و D_3 خاموش هستند. با فرض D_4 خاموش، در V_o ، KCL نوشته می‌شود:

$$\frac{V_o - 12}{1k} + \frac{V_o - (-6)}{1k} = 0 \Rightarrow V_o = 3 \text{ ولت}$$

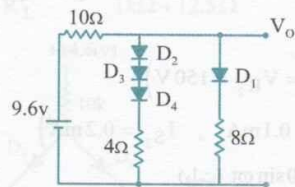
در $V_i = +18$ ولت با فرض D_4 خاموش داریم:

$$\frac{V_o - 18}{1k} + \frac{V_o + 6}{1k} = 0$$

$$V_o = 6$$

بنابراین D_4 روشن است و V_o به $+5$ ولت تثبیت می‌شود.

مثال ۱۴: در مدار شکل (۲۹-۱) جریان هر دیود را حساب کنید:



شکل ۲۹-۱

$$V_D = 0.6 \text{ V}, \quad r_D = 2 \Omega$$

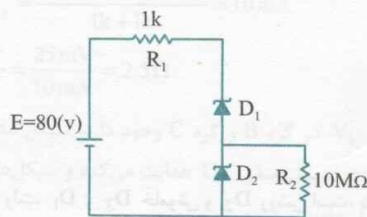
حل: با نوشتن KCL در خروجی V_o داریم:

$$\frac{V_o - V_{D1}}{r_{D1} + 8\Omega} + \frac{V_o - 3V_D}{3(r_D) + 4\Omega} + \frac{V_o - 9.6}{10\Omega} = 0 \Rightarrow V_o = 4 \text{ V}$$

$$I_{D_1} = \frac{4V - V_{D_1}}{r_{D_1} + 8\Omega} = 0.36A$$

$$I_{D_2} = \frac{4 - 3V_D}{3r_D + 4} = 0.22A$$

مثال ۱۵: در مدار شکل (۳۰-۱) جریان‌های I_{D_1} و I_{D_2} را حساب کنید.



$$D_1 (V_{Z_1} = 50V, I_{S_1} = 10\mu A)$$

$$D_2 (V_{Z_2} = 40V, I_{S_2} = 5\mu A)$$

شکل ۳۰-۱

حل:

حداقل جریانی که از D_1 می‌گذرد، برابر $I_{S_1} = 10\mu A$ است. اگر D_2 در ناحیه شکست باشد، ولتاژ دو سر آن برابر با $V_{Z_2} = 40$ ولت است، بنابراین:

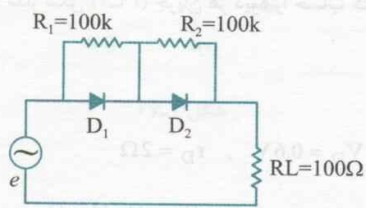
$$I_{(R_2)} = \frac{V_{Z_2}}{R_2} = 4\mu A$$

$$I_{D_2} = 10\mu A - 4\mu A = 6\mu A$$

چون جریان $6\mu A$ بیشتر از I_{S_2} است، D_2 در ناحیه شکست قرار دارد:

$$V_{D_1} = E - V_{Z_2} = 40V$$

مثال ۱۶: در مدار شکل (۳۱-۱) حداکثر ولتاژ معکوس دو سر D_1 و D_2 را حساب کنید.



$$(V_{R_1} = V_{R_2} = 150V)$$

$$(I_{S_1} = 0.1mA, I_{S_2} = 0.2mA)$$

$$e = 200 \sin \omega t \text{ (ولت)}$$

شکل ۳۱-۱

حل:

در سیکل مثبت D_1 و D_2 روشن هستند. در سیکل منفی D_1 و D_2 خاموش هستند، در ولتاژ قله منفی که 200 ولت است، توزیع ولتاژ معکوس ایجادشده دو سر دیودها را به دست می‌آوریم:

$$I_{S_1} + I_{(R_1)} = I_{S_2} + I_{(R_2)}$$

$$0.1 \text{ mA} + I_{(R_1)} = 0.2 \text{ mA} + I_{(R_2)} \Rightarrow I_{(R_1)} = 0.1 \text{ mA} + I_{(R_2)}$$

از طرفی با صرف نظر کردن افت ولتاژ روی R_L داریم:

$$200 \text{ V} = I_{(R_1)} (100 \text{ k}) + I_{(R_2)} (100 \text{ k})$$

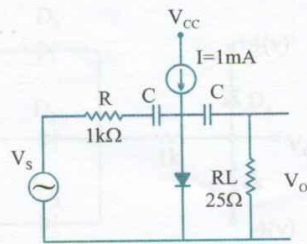
$$I_{(R_2)} = 0.95 \text{ mA}, \quad I_{(R_1)} = 1.05 \text{ mA}$$

$$V_{R_2} = 0.95 \text{ mA} (100 \text{ k}) = 95 \text{ V}$$

$$V_{R_1} = 105 \text{ V}$$

در این مثال دیده می شود که وصل مقاومت هایی به موازات دیوده ها با جریان های I_S متفاوت می تواند توزیع پتانسیل معکوس دو سر دیوده را تقریباً متعادل کند. در دستگاه های الکترونیکی هنگامی که یک دیود توانایی تحمل حداکثر ولتاژ منفی ورودی را ندارد، الزاماً باید از چند دیود سری استفاده شود.

دیودهای هم نام، I_S های متفاوتی دارند و با در نظر گرفتن اثر دمایی، ملاحظه می شود که I_S ها از یکدیگر فاصله بیشتری می گیرند. وصل مقاومت موازی با دیوده ها می تواند توزیع متعادلی را ایجاد کند. این مقاومت های موازی را مقاومت های متعادل کننده حالت استاتیک هم می نامند.



شکل ۳۲-۱

مثال ۱۷: در مدار شکل (۳۲-۱) اگر $V_S = 1 \sin \omega t$ ولت باشد، V_O را حساب کنید. خازن ها به اندازه کافی بزرگ هستند.

حل:

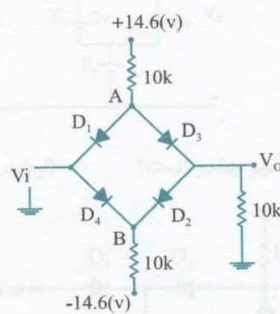
در حالت DC خازن باز و در حالت ac خازن اتصال کوتاه است:

$$I_D = 1 \text{ mA}$$

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = 25 \Omega$$

$$R'_L = r_d \parallel R_L = 12.5 \Omega$$

$$V_O = \frac{V_S}{R + R'_L} \cdot R'_L = \frac{1 \sin \omega t}{1 \text{ k}\Omega + 12.5 \Omega} \cdot 12.5 \Omega \approx 12.3 \sin \omega t \text{ (mV)}$$



شکل ۳۳-۱

مثال ۱۸: در مدار شکل (۳۳-۱) با فرض $V_D = 0.6$ ولت، مشخصه انتقال $(V_O - V_I)$ را رسم کنید.

حل:

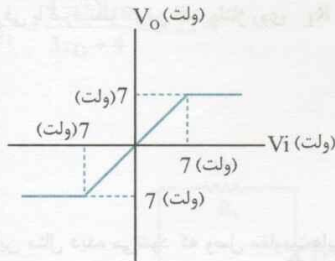
برای آنکه D_1 و D_2 خاموش باشند، V_O عبارت است از:

$$V_O = \frac{14.6 - 0.6}{10 \text{ k} + 10 \text{ k}} \times 10 \text{ k} = 7 \text{ (ولت)} \Rightarrow V_A = 7.6 \text{ (ولت)}$$

بنابراین اگر ولت $V_i > 7$ ولت باشد D_1 و D_2 خاموش هستند.

برای آنکه D_3 و D_4 خاموش باشند، V_o عبارت است از:

$$V_o = -\frac{14.6 - 0.6}{10k + 10k}(10k) = -7 \text{ (ولت)} \Rightarrow V_B = -7.6 \text{ (ولت)}$$



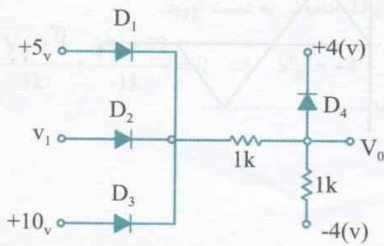
بنابراین اگر $V_i < -7$ ولت باشد D_3 و D_4 خاموش هستند، به ازای مقادیر ورودی بین -7 ولت و $+7$ ولت $V_o = V_i$ است. در شکل (۳۴-۱) مشخصه انتقال $V_o = V_i$ رسم شده است. مدار شکل (۳۳-۱) به عنوان محدودکننده ولتاژ در مدارهای مقایسه‌کننده ولتاژ برای ایجاد پسماند (هیستریزیس) به کار می‌رود.

شکل ۳۴-۱ مشخصه انتقال $(V_o - V_i)$



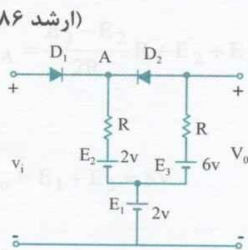
مجموعه تست‌های آزمون سراسری

۱. در مدار شکل روبه‌رو، دیودها ایده‌آل فرض شده‌اند. اگر ولتاژ ورودی V_i در محدوده $12V < V_i < 16V$ باشد، کدام‌یک از گزینه‌های زیر در مورد V_o صادق است؟ (ارشد ۸۵)



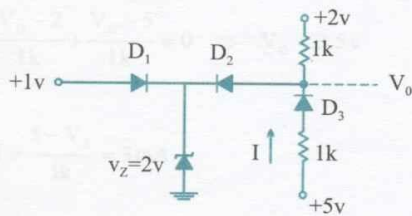
- (۱) $V_o = +4V$
- (۲) $V_o = -4V$
- (۳) $V_o = \frac{1}{2}V_i + 2$
- (۴) $V_o = \frac{1}{2}V_i - 2$

۲. در شکل روبه‌رو در چه محدوده‌ای از V_i رابطه بین ورودی و خروجی $V_o = V_i$ می‌شود. دیودها ایده‌آل هستند. (ارشد ۸۶)



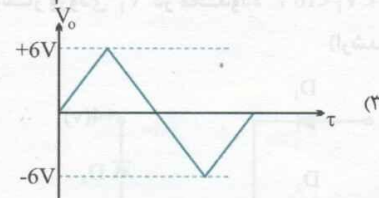
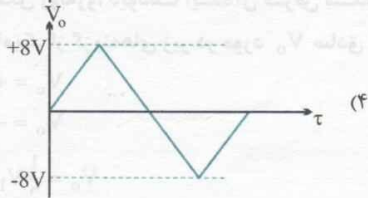
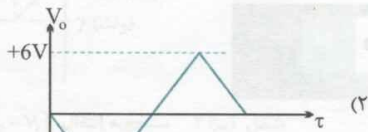
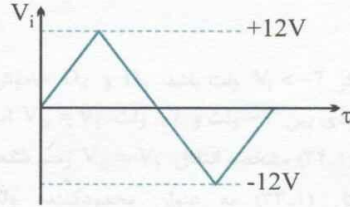
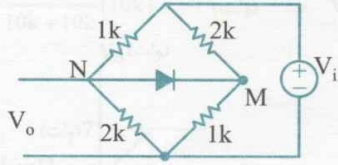
- (۱) $2 < V_i < 4$
- (۲) $4 < V_i < 6$
- (۳) $6 < V_i < 8$
- (۴) $8 < V_i < 10$

۳. در مدار شکل زیر همه دیودها ایده‌آل هستند. مقدار جریان I بر حسب میلی‌آمپر چقدر است؟ (ارشد ۸۸)

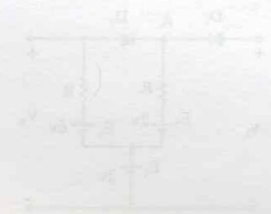


- (۱) صفر
- (۲) 1.5
- (۳) 2
- (۴) 3

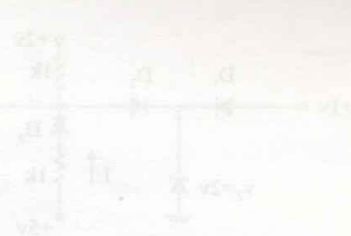
۴. در مدار شکل مقابل ورودی داده شده است. شکل موج خروجی کدام است؟ (دیود D ایده آل است) (ارشد ۸۹)



- a) $V_1 > V_2$
- b) $V_2 > V_1$
- c) $V_1 > V_3$
- d) $V_3 > V_1$



- a) ۲.۱
- b) ۲.۲
- c) ۲.۳
- d) ۲.۴



پاسخنامه

۱. گزینه ۱ درست است.

در این صورت $V_i = 12$ ولت، D_1 و D_3 خاموش و D_2 روشن است. V_o را در حالت D_4 خاموش به دست آورید.

$$\frac{V_o + 4}{1k} + \frac{V_o - 12}{1k} = 0 \Rightarrow V_o = +4$$

در این صورت D_4 روشن است و $V_o = +4$ ولت است.

برای $V_i = +16$ ولت هم D_4 روشن است و $V_o = +4$ ولت خواهد شد.

۲. گزینه ۳ درست است.

برای $V_o = V_i$ باید D_1 و D_2 روشن باشند.

۱- ولتاژ V_A در حالت خاموش بودن D_1 برابر است با:

$$V_A = \frac{E_3 - E_2}{2R} R + E_2 + E_1 = 6V$$

پس برای روشن شدن D_1 ورودی باید از 6 ولت بیشتر باشد.

۲- V_o در حالت خاموشی D_2 برابر است با:

$$V_o = E_1 + E_3 = 8V$$

برای روشن شدن D_2 ، V_i باید کمتر از 8 ولت باشد.

۳. گزینه ۴ درست است.

با فرض خاموش داریم:

$$\frac{V_o - 2}{1k} + \frac{V_o - 5}{1k} = 0 \Rightarrow V_o = 3.5v$$

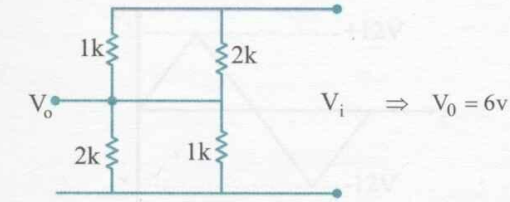
در این صورت D_2 روشن است و V_o برابر $V_z = 2v$ است.

$$I = \frac{5 - V_z}{1k} = 3mA$$

۴. گزینه ۲ درست است.

فرض دیود \Rightarrow
$$\begin{cases} V_M = \frac{12}{3k} \times 1k = 4 \\ V_N = \frac{12}{3} \times 2 = 8 \end{cases} \Rightarrow D \text{ (روشن)} \Rightarrow$$

 خاموش ($+V_i$)



فرض دیود \Rightarrow
$$\begin{cases} V_M = -4 \text{ V} \\ V_N = -8 \text{ V} \end{cases} \Rightarrow D \text{ (خاموش)} \Rightarrow$$

 خاموش ($-V_i$)

