
PN 접합 다이오드

반도체란 무엇인가?

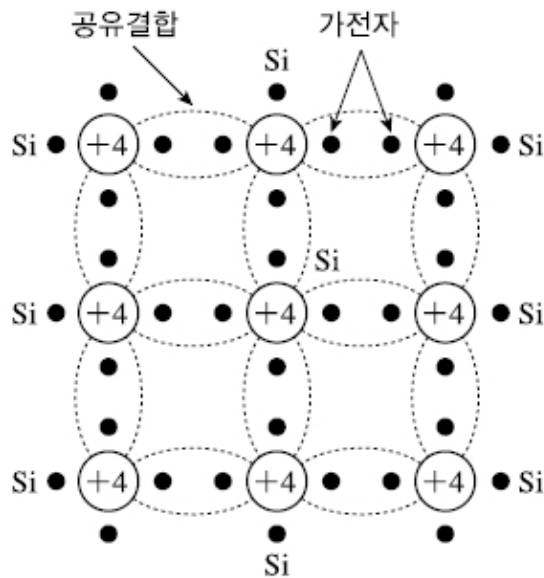
□ 도체와 반도체

- 절연체(insulator): 플라스틱, 나무, 유리 등과 같이 정상적인 조건에서 전류가 흐르지 못하는 물질
- 도체(conductor): 금속처럼 전류가 잘 흐르는 물질
- 반도체: 도체와 절연체의 중간적인 도전성을 갖는 물질
- 실리콘(Si), 게르마늄(Ge), 탄소(C) 등은 단일 원소로 구성된 반도체이며, 갈륨-비소(GaAs), 인듐-인(InP) 등은 화합물 반도체임.

반도체란 무엇인가?

□ 물질의 원자구조

- 원자는 양전하를 띠는 양성자와 전기적 중성인 중성자로 구성된 원자핵(nucleus), 핵 주위를 돌고 있는 전자(electron)로 구성
- 전자들은 원자핵 주위에 궤(궤도) 형태로 확률적으로 분포하며, 가장 바깥 궤도(orbit)에 위치하고 있는 전자를 가전자(valence electron)라고 함
- 가전자의 수는 물질의 특성과 직접적으로 관련됨

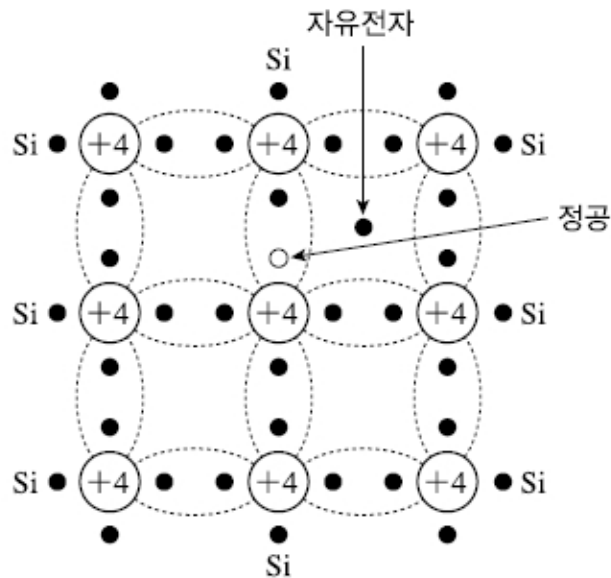


[그림 2-1] 실리콘 결정을 형성하고 있는 공유결합의 2차원적인 표현

반도체란 무엇인가?

□ 전자-정공쌍

- 가전자가 에너지를 얻게 되면, 공유결합이 파괴되어 원래의 공유결합 위치로부터 이탈되는데, 이렇게 이동한 가전자를 '자유전자' 또는 전도전자(conduction electron)라고 함
- 공유결합이 파괴되어 전자가 이탈되면, 원래 전자가 있던 공유결합 위치에 전자의 빈자리가 남게 되며 이것을 정공(hole)이라 함



[그림 2-2] 공유결합이 끊어져서 생성된 전자-정공쌍

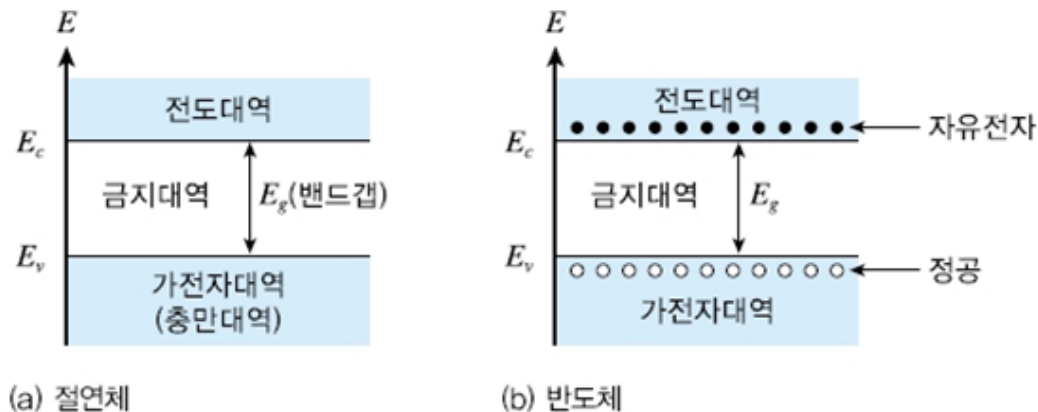
반도체란 무엇인가?

□ 고체의 에너지 대역

- 가전자들이 존재하는 가장 높은 에너지 상태를 가전자대역(valence band)이라 함
- 전도대역(conduction band) : 이 보다 더 높은 에너지 상태
- 가전자대역과 전도대역 사이의 에너지 상태에는 전자가 존재할 수 없음

➡ 금지대역(forbidden band)

금지대역의 폭을 '밴드갭(band gap) 에너지'라고 함 ➡ 가전자가 공유결합을 끊고 전도대역으로 이동하는데 필요한 최소의 에너지



[그림 2-3] 절연체와 반도체의 에너지 대역

반도체란 무엇인가?

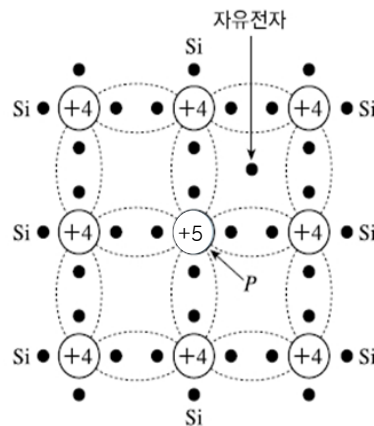
□ 진성반도체와 불순물 반도체

- 진성반도체(intrinsic semiconductor): 불순물(dopant)이 첨가되지 않은 순수한 반도체
- 진성 반도체에 3가 또는 5가 불순물을 첨가하여 전자 혹은 정공의 수를 증가시키는 과정을 도핑(doping)이라 하며, 불순물이 도핑된 반도체를 불순물(extrinsic) 반도체라고 함
- 불순물 반도체는 도핑 물질에 따라 P형 반도체와 N형 반도체로 구분

반도체란 무엇인가?

□ 진성반도체와 불순물 반도체

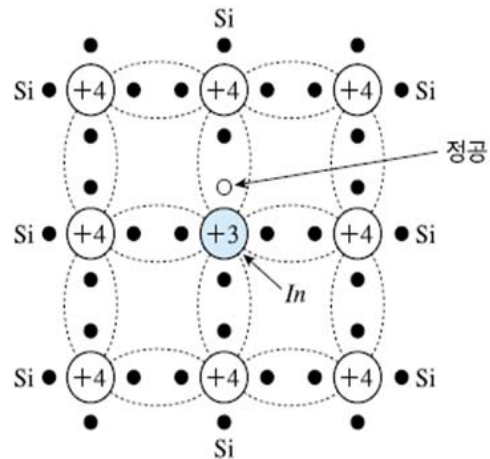
- 진성 실리콘에 인(P), 비소(As), 안티몬(Sb)과 같은 5가 불순물을 첨가하면, [그림 2-4(a)]와 같이 결정격자에서 실리콘이 차지했던 자리에 불순물 원자가 들어가고, 불순물이 가지고 있던 5개의 가전자 중 4개는 주변의 실리콘 원자들과 공유결합을 이루고, 나머지 1개의 가전자는 불순물 원자에서 이탈하여 자유전자가 됨
- N형 반도체는 진성 실리콘에 5가 불순물을 첨가하여 음(-)전하를 띠는 전자의 농도를 증가시킨 반도체로, 이때 5가 불순물은 자유전자를 제공하므로 도너 불순물(donor impurity)이라고 함



반도체란 무엇인가?

□ 진성 반도체와 불순물 반도체

- 진성 실리콘에 붕소(B), 인듐(In), 갈륨(Ga)과 같은 3가 불순물을 첨가하면, [그림 2-4(b)]와 같이 결정격자에서 실리콘이 차지했던 자리에 불순물 원자가 들어감
- 불순물 원자는 3개의 가전자를 가지고 있으므로, 주변의 실리콘 원자들과 공유결합을 이루기 위해 1개의 가전자가 부족하게 되고, 이는 1개의 정공을 생성
- 따라서 3가 불순물은 정공을 제공하므로, 억셉터 불순물(acceptor impurity)이라고 함



반도체란 무엇인가?

- 진성 반도체는 열적으로 생성된 전자와 정공만이 캐리어가 되므로 자유전자와 정공의 농도가 같다.
- 진성 캐리어 농도 n_i

$$n_i = BT^{\frac{2}{3}} e^{\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)}$$

밴드갭 에너지(E_g), 온도(T), 볼츠만 상수 $k=8.6 \times 10^{-5} \text{eV/K}$,

B 특정 반도체 물질에 관련된 계수 (실리콘의 경우, $B=5.23 \times 10^{15} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$)

$T=300^\circ\text{K}$ 에서 실리콘 진성 반도체의 캐리어 농도 $n_i=1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$

- 진성 반도체는 상온에서의 캐리어 농도($n_i=1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$)가 실리콘 원자의 농도 ($5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$)보다 매우 작으므로, 전류가 아주 작아 그 용도 또한 매우 제한적이다.

반도체란 무엇인가?

- 불순물 농도 $N_D=2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 인 N형 반도체의 전자농도 $n_n = N_D + n_i \approx N_D$

$$\text{정공농도 } p_n \approx n_i^2 / N_D = 11.25 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$$

$$\rightarrow n_n \gg p_n$$

- 불순물 농도 $N_A=10^{17} \text{cm}^{-3}$ 인 P형 반도체의 정공농도 $p_p = n_i + N_A \approx N_A$

$$\text{전자농도 } n_p \approx n_i^2 / N_A = 2.25 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$$

$$\rightarrow n_p \ll p_p$$

- N형 반도체에서는 전자의 농도가 정공의 농도보다 매우 크므로 전자가 다수 캐리어가 되고, P형 반도체에서는 정공의 농도가 전자의 농도보다 매우 크므로 정공이 다수 캐리어가 된다.

반도체란 무엇인가?

□ 반도체에서의 전류흐름

- 반도체에 흐르는 전류는 캐리어의 농도 차에 의해 발생하는 확산전류(diffusion current) 성분과 인가되는 전기에 의해 캐리어가 이동하여 발생하는 표류전류(drift current) 성분으로 구성
- 농도가 높은 영역에서 낮은 영역으로 이동하는 확산현상이 발생하며, 이와 같은 캐리어의 확산에 의해 발생하는 전류를 '확산전류'라고 함

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$q = 1.6 \times 10^{-19} C$: 전자의 전하량

D_n : 전자의 확산 계수

반도체란 무엇인가?

- 외부에서 반도체에 전계를 인가하면 캐리어가 무질서한 운동을 하면서 전계방향으로 이동하는데, 이와 같은 캐리어 표류(drift)에 의해 흐르는 전류를 '표류전류'라고 함

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

$= \sigma E$
 $= \frac{1}{\rho} E$

전도율 \swarrow

\nwarrow 저항율

$q = 1.6 \times 10^{-19} C$: 전자의 전하량
 n, p : 각각 전자와 정공의 농도
 μ_n, μ_p : 각각 전자와 정공의 이동도

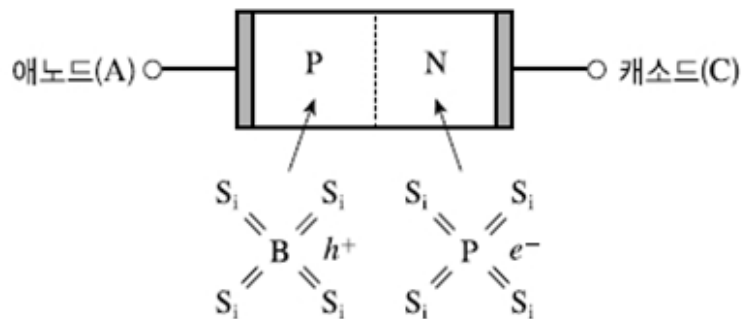
$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

➔ 도핑을 선택하여 반도체의 전도율을 조절할 수 있다.

PN 접합 다이오드

□ 평형상태의 PN접합

- PN접합은 3가 불순물이 도핑된 P형 반도체와 5가 불순물이 도핑된 N형 반도체가 서로 접합된 형태
- P형 반도체 영역에는 정공의 농도가 전자보다 매우 크고, N형 반도체 영역에는 전자의 농도가 정공보다 매우 큼
- P영역을 애노드(anode), N형 영역에 연결된 전극을 캐소드(cathode)라 함
- 전류는 애노드에서 캐소드로 흐름



(a) PN 접합의 구조



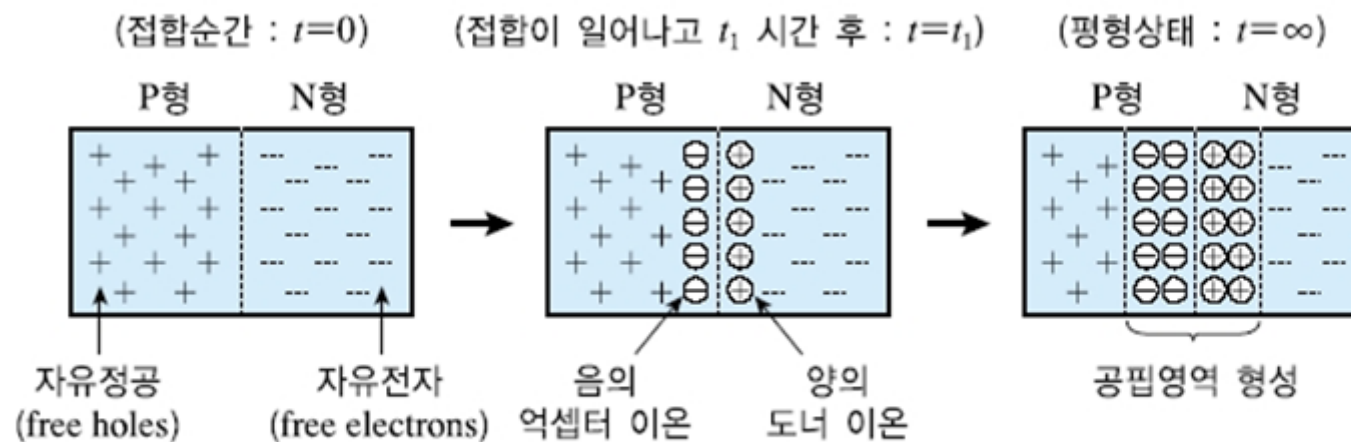
(b) 다이오드의 기호

[그림 2-5] PN 접합의 구조와 다이오드의 기호

PN 접합 다이오드

□ PN 접합 다이오드의 특성

- PN 접합은 확산 접합에 의해 만들어짐
- N형 반도체를 가열시킨 상태에서 3가 원소기체를 주입
- 억셉터 이온이 N형 반도체 속으로 확산되어 P형 반도체 영역에 형성
- 반대로 P형 반도체에 5가 원소를 주입하여 도너이온이 P형 반도체 속으로 확산하도록 하여 N형 반도체 영역을 형성함



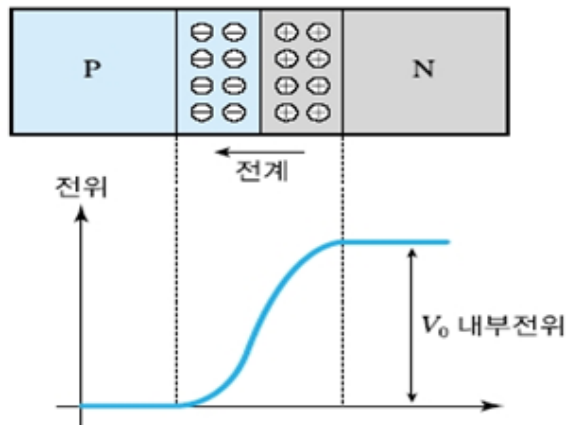
[그림 2-6] PN 접합에서 공핍영역의 형성과정

PN 접합 다이오드

- 공핍 영역의 이온화된 원자들에 의해 공핍영역에 발생하는 전위차를 고유 전위 장벽 또는 고유 전위라고 함
- 평형 상태에서 PN 접합에 발생하는 고유 전위
- 고유 전위는 N영역과 P영역의 도핑 농도의 관계

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

- N_A 와 N_D 는 각각 P영역에 도핑된 억셉터 농도, N영역에 도핑된 도너 농도.
- n_i 는 진성 반도체의 캐리어 농도, $V_T = kT/q$ 는 열전압

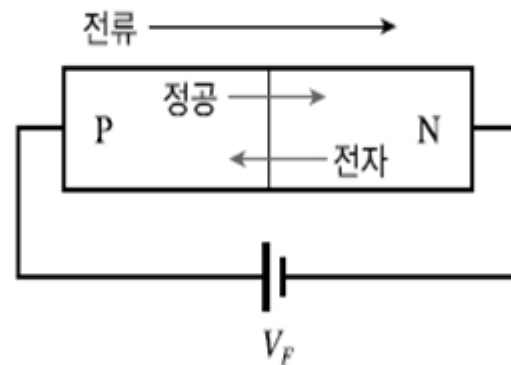


[그림 2-7] PN 접합의 고유전위

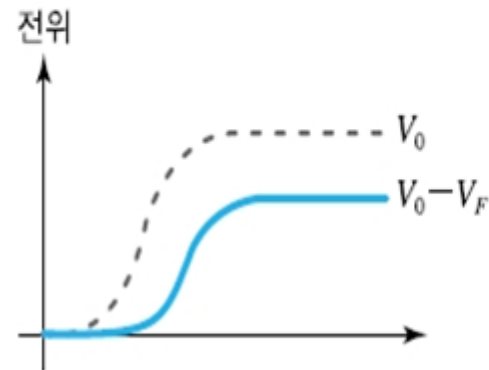
PN 접합 다이오드

□ PN 접합과 바이어스

- 순방향 바이어스
- P영역에서 양[+]의 전압을 N영역에 [-]의 전압이 인가된 상태를 순방향(forward) 바이어스가 인가 되었다고 함



(a) 순방향 바이어스 V_F 의 인가

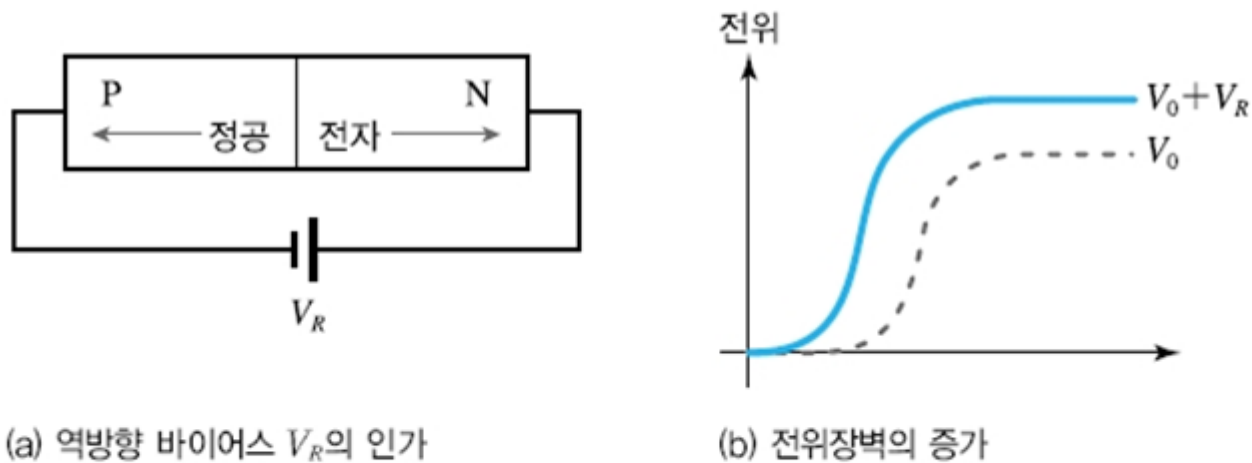


(b) 전위장벽의 감소

[그림 2-8] PN 접합에 순방향 바이어스가 가해진 경우

PN 접합 다이오드

- 역방향 바이어스
- P영역에 음(-)의 전압을, N영역에 양(+)의 전압이 인가된 상태를 역방향(reverse) 바이어스가 인가 되었다고 함

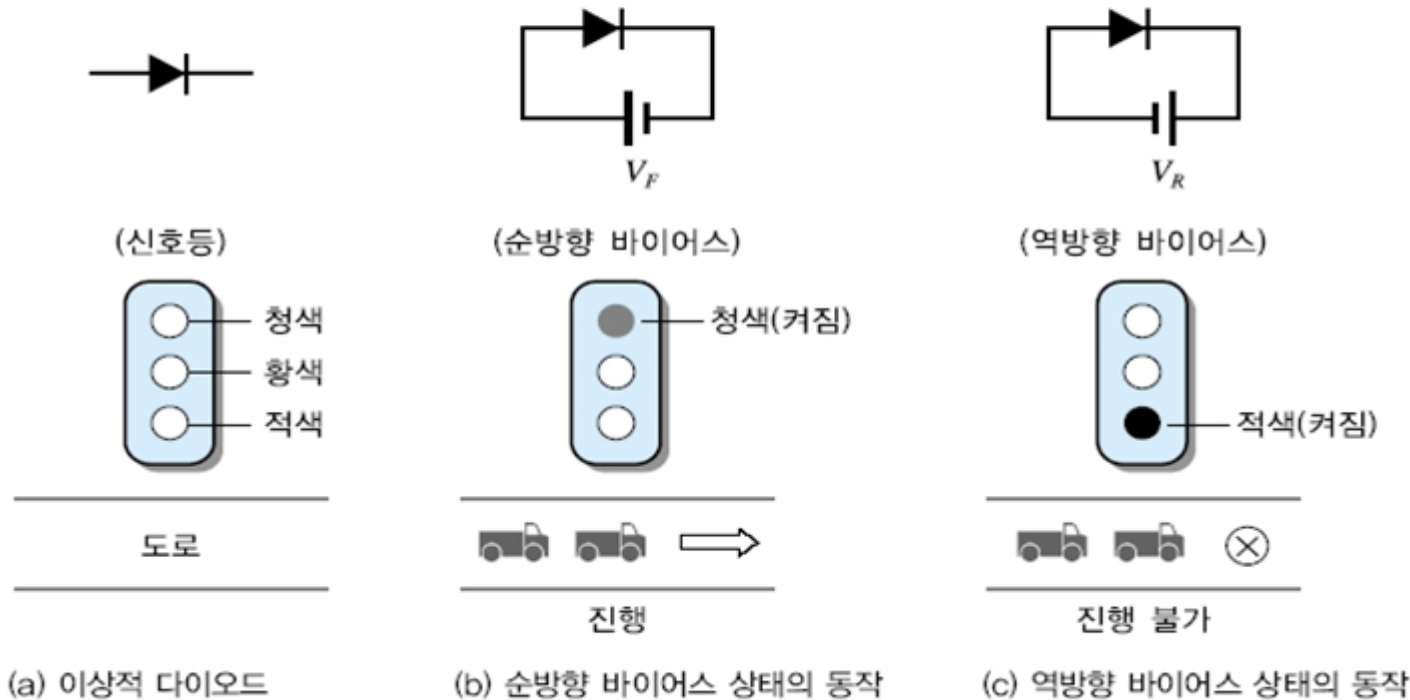


[그림 2-9] PN 접합에 역방향 바이어스가 가해진 경우

다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 이상적 다이오드 모델

- 이상적(ideal) 다이오드 모델은 다이오드의 동작을 개방상태와 도통상태를 갖는 가장 간단한 형태의 모델

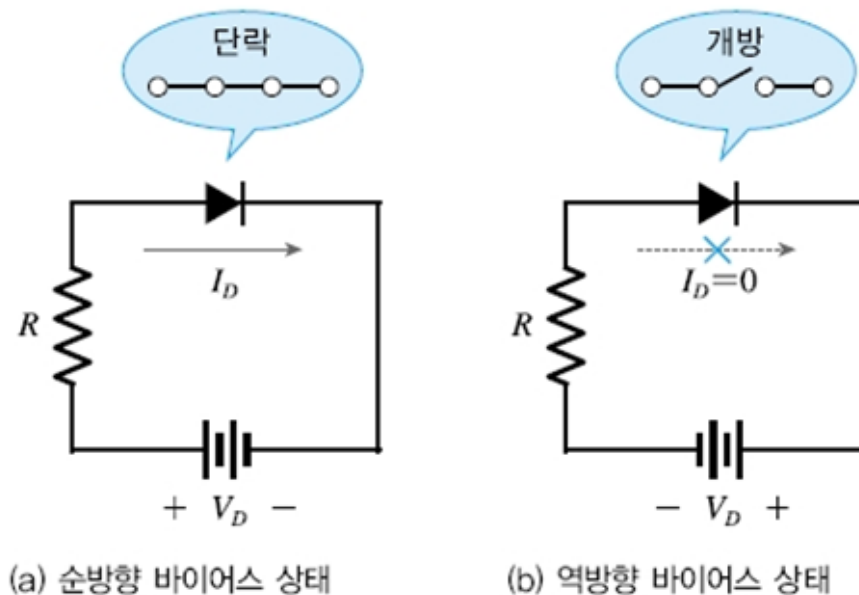


[그림 2-10] 다이오드의 이상적 동작과 신호등 동작의 비유

다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 이상적 다이오드의 등가회로

- $V_D > 0$ 인 순방향 바이어스 상태가 되면 다이오드에 전류가 흐르고, 이를 도통상태라고 함
- $V_D < 0$ 인 역방향 바이어스 상태가 되면 다이오드에 흐르는 전류는 0이 되어 개방 스위치와 같은 상태로 해석됨

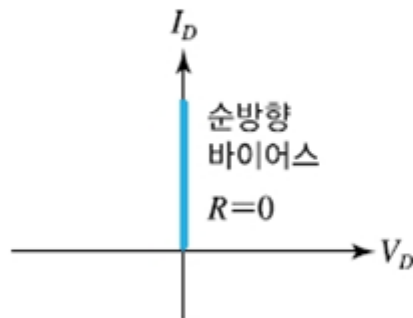


[그림 2-11] 이상적 다이오드의 등가회로

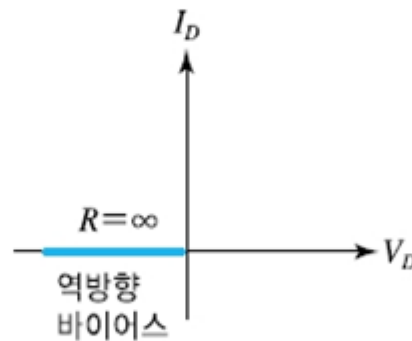
다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 전류 - 전압 특성

- 이상적인 다이오드의 전류 - 전압 특성은 순방향 바이어스 상태에서 저항이 0이고 전류는 무한대로 흐름
- 역방향 바이어스 상태에서는 저항이 무한대이고 전류는 0



(a) 순방향 바이어스 상태



(b) 역방향 바이어스 상태



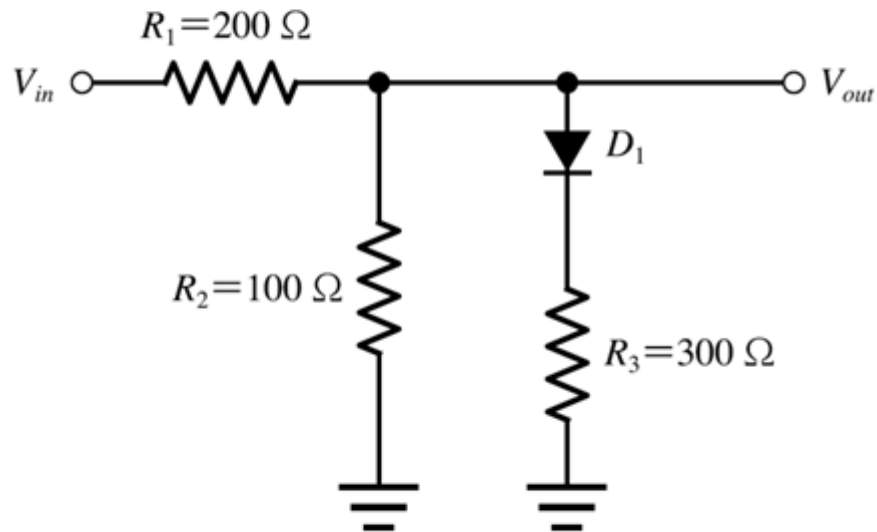
(c) 이상적 모델

[그림 2-12] 이상적 다이오드의 전류-전압 특성

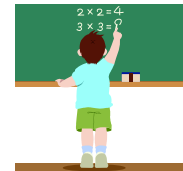
다이오드의 DC 해석과 등가모델

예제 2.1

PN 접합 다이오드가 포함된 [그림 2-13]의 회로에 대해 이상적인 다이오드 모델을 적용하여 해석하고, 입출력 전달특성을 그래프로 그려라.



[그림 2-13]



다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 비선형 다이오드 모델

- 다이오드에 인가된 전압과 전류 사이에 비선형적인 관계

$$I_D = I_S (e^{V_D/V_T} - 1) \quad (2.14)$$

- I_S 값은 통상 $10^{-15} \sim 10^{-13} \text{A}$ 를 가짐.
- V_T 는 상온(300K)에서 26mV
- 순방향 바이어스 상태와 역방향 바이어스 상태로 구분하여 근사적으로 표현 가능
- $V_D \gg V_T$ 이면 역방향 포화전류 I_S 를 무시

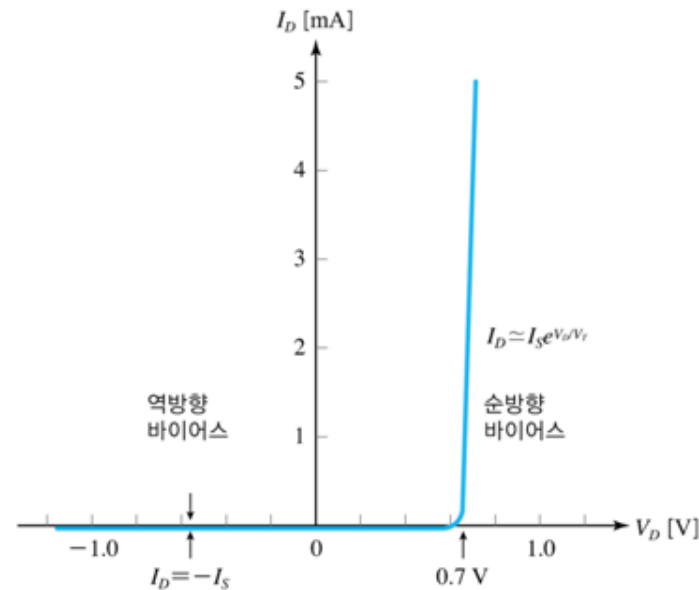
$$I_D \simeq I_S e^{V_D/V_T} \quad (2.15)$$

다이오드의 DC 해석과 등가모델

- $V_D < 0$ 이고 $|V_D| \ll V_T$ 라면 다이오드에 흐르는 전류는 식 (2.16)으로 근사화

$$I_D \simeq -I_S \quad (2.16)$$

- 다이오드에 순방향 바이어스가 인가되면 다이오드 전류는 식 (2.15)에 따라 애노드에서 캐소드로 흐르고 역방향 바이어스가 인가되면 다이오드 전류는 식 (2.16)에 따라 캐소드에서 애노드로 작은 전류만 흐름



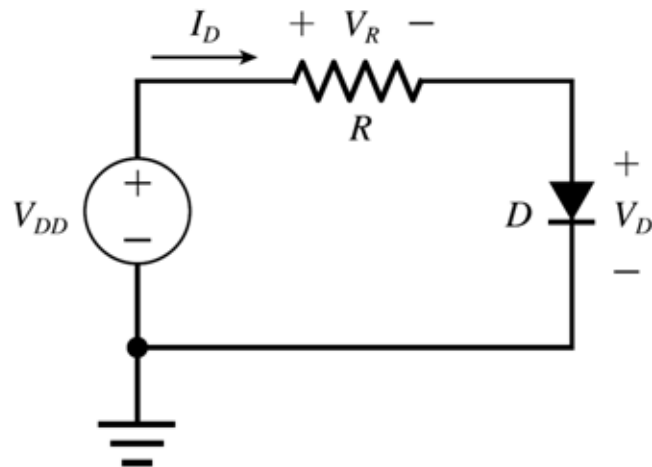
[그림 2-15] PN 다이오드의 비선형 전류-전압 특성

다이오드의 DC 해석과 등가모델

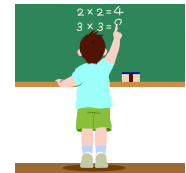
예제 2.2

[그림 2-16]의 회로에서,

- (a) 비선형 다이오드 모델을 적용하여 다이오드 전압 V_D 를 해석하라.
- (b) $V_{DD}=9\text{ V}$, $R=5\text{ k}\Omega$ 일때 V_D 를 구하라. 다이오드의 역방향 포화전류는 $I_S=10^{-13}\text{ A}$ 로 가정한다.



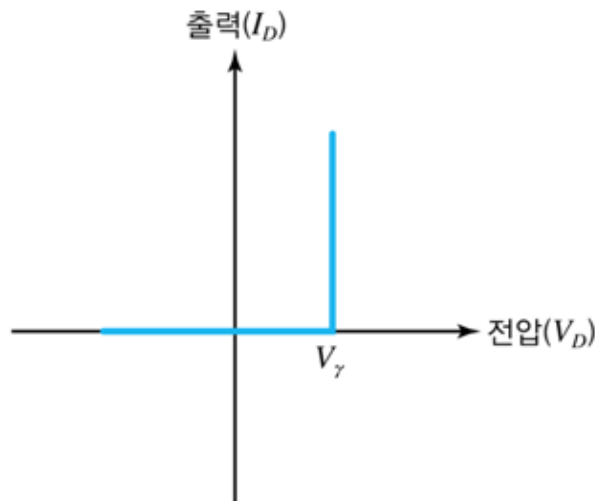
[그림 2-16]



다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 정전압 다이오드 모델

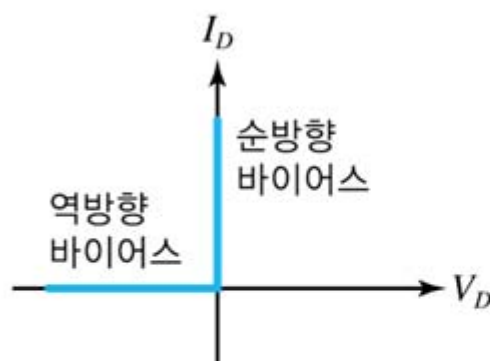
- 비선형 다이오드 모델은 지수 함수를 포함하고 다이오드 전류와 전압이 비선형적인 관계를 가짐
- $V_D < 0.7V$ 이면 전류는 거의 0이고 0.7V에서 전류가 급격히 증가
- 정전압 모델에서 전류가 급격히 증가하기 시작하는 임계전압을 턴온 전압 커트인 전압이라고 함
- 이는 700~800mV정도의 값을 가짐



[그림 2-17] 정전압 다이오드 모델의 전류-전압 근사화

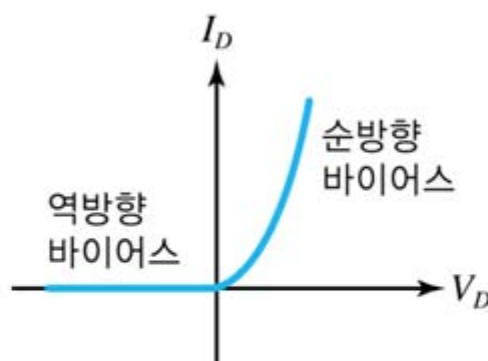
다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 3가지 다이오드 모델의 비교



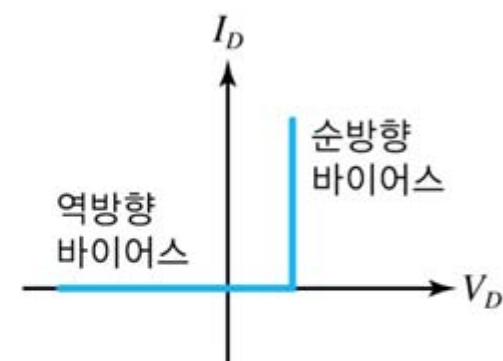

이상적 다이오드

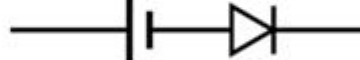
(a) 이상적 모델





(b) 비선형 모델




 V_r

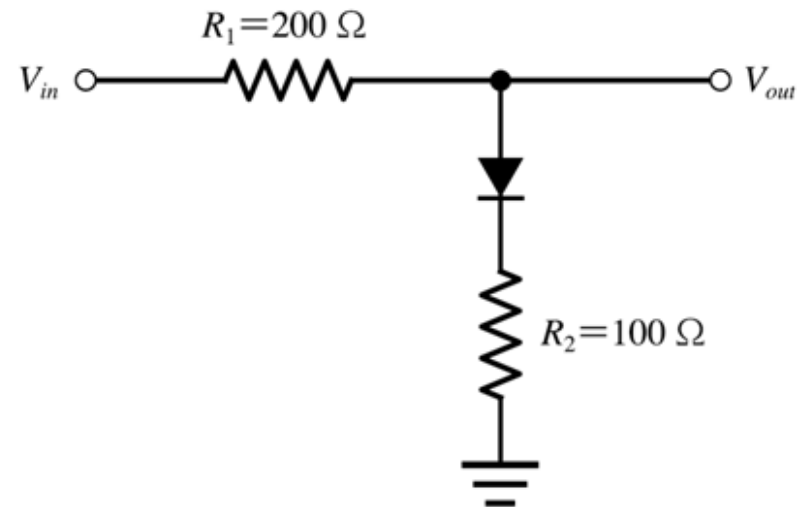
(c) 정전압 모델

[그림 2-18] 다이오드 모델

다이오드의 DC 해석과 등가모델

예제 2.3

[그림 2-19]의 회로에 대해 정전압 다이오드 모델을 적용하여 해석하고, 입출력 전달특성을 그래프를 그려라.



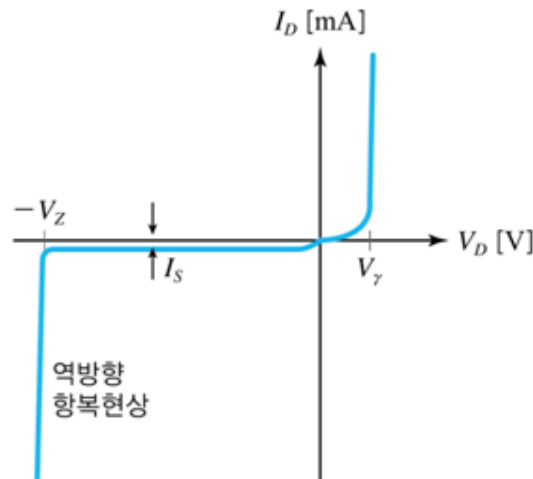
[그림 2-19]



다이오드의 DC 해석과 등가모델

□ 역방향 항복

- 다이오드에 역방향 바이어스에 큰 전압이 인가되면 갑자기 과도한 전류가 흐르게 되는 항복(breakdown) 현상이 발생
- 제너항복(Zener breakdown) : PN 접합에 큰 역방향 바이어스 전압이 인가되면 전계에 의해 공유 결합이 끊어지고, 이에 전자 - 전공쌍이 급격하게 많이 발생되어 큰 전류가 흐르는 현상
- 제너항복이 발생되면 다이오드 양단자의 전압은 거의 일정한 V_Z 로 유지되고, 전류만 급격히 증가

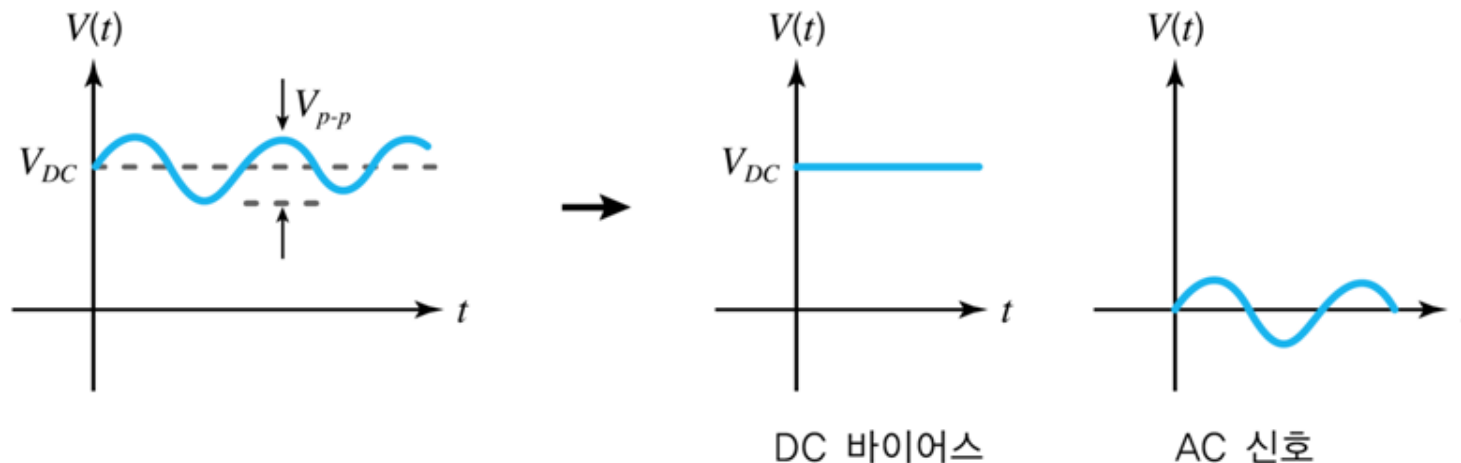


[그림 2-22] 역방향 항복특성이 포함된 다이오드 전류-전압 특성

다이오드의 소신호 등가회로

□ 소신호 동작

- 소신호 등가모델은 DC 바이어스에 AC 신호성분이 중첩되어 있는 상태에서 AC 신호의 작은 변화에 의한 다이오드의 동작을 나타내기 위해 사용됨
- 소신호만 인가한다면 인가된 소신호의 기준점은 원점
- DC 바이어스를 인가하여 신호파형의 기준점을 이동시켜 출력파형의 변화가 모두 포함되도록 동작영역을 확보하기 위해 DC 바이어스가 필요



[그림 2-23] DC 바이어스와 정현파 신호

다이오드의 소신호 등가회로

- 다이오드 양단에 걸리는 전압이 V_{D1} [단 $V_{D1} > V_\gamma$]
- 다이오드에 흐르는 전류 I_{D1}
 ΔV_D 만큼 인가하여 V_{D2} 된다고 가정[$V_{D2} = V_{D1} + \Delta V_D$]
- 식(2.14)를 사용하여 전압의 작은 변화 ΔV_D 에 의한 다이오드 전류의 변화 ΔI_D 를 구할 수 있음



$$I_{D1} \cong I_S e^{V_{D1}/V_T}$$

- $V_{D2} = V_{D1} + \Delta V_D$ 일 때의 전류를 I_{D2} 라 하면

$$I_{D2} \cong I_S e^{(V_{D1} + \Delta V_D)/V_T}$$

$$I_{D2} = I_S (e^{V_{D1}/V_T} \cdot e^{\Delta V_D/V_T})$$

$$e^{\frac{\Delta V_D}{V_T}} \approx 1 + \frac{\Delta V_D}{V_T}$$

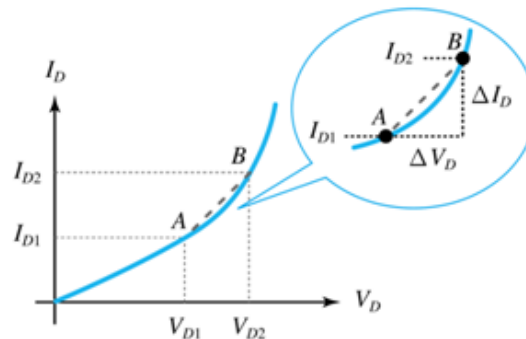
다이오드의 소신호 등가회로

- 식(2.20)을 식(2.19)에 대입하면
$$I_{D2} \cong I_S e^{V_{D1}/V_T} \left(1 + \frac{\Delta V_D}{V_T}\right)$$

$$= I_{D1} \left(1 + \frac{\Delta V_D}{V_T}\right)$$

$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} = \frac{\Delta V_D}{V_T} I_{D1}$$

- 소신호 해석에서는 어느 한 점의 작은 변화에 의해 회로의 동작이 발생
이러한 변화가 직선상에서 발생하는 것으로 해석
- 이때 한 점을 바이어스 점이 Q점 혹은 동작점이라고 함



[그림 2-24] 비선형적 다이오드 특성의 선형적 근사화 ($\Delta V_D \ll V_T$ 인 경우)

바이어스 점 (bias point)

Q점 (quiescent point)

동작점 (operating point)

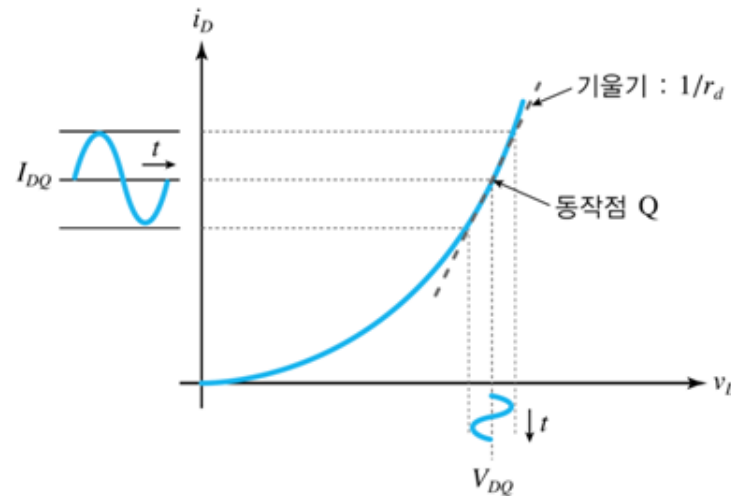
다이오드의 소신호 등가회로

□ 소신호 등가모델

- 전류와 전압의 변화는 식(2.22)가 나타내는 바와 같이 선형적인 관계로 표현

$$r_d \simeq \left. \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \right|_{V_{DQ}} = \frac{V_T}{I_{DQ}}$$

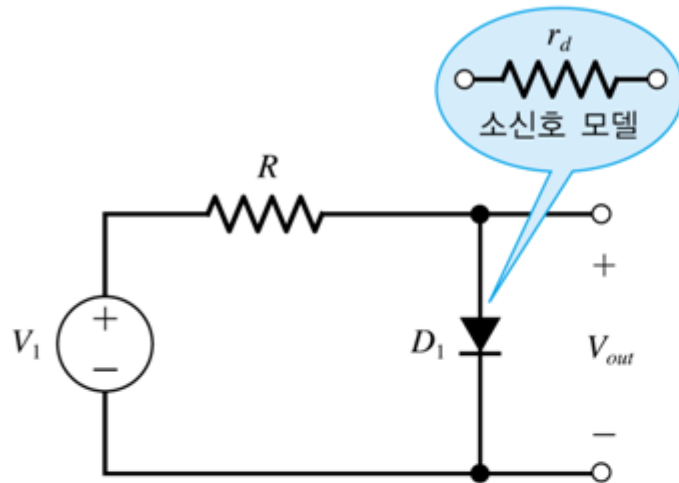
- I_{DQ} 는 순방향 바이어스 전압 V_{DQ} 에 의한 다이오드 전류를 나타냄
- 소신호 등가저항 r_d : 동작점에서 전류 - 전압 특성 곡선의 기울기 역수가 되며, 열전압 V_T 와 바이어스 전류 I_{DQ} 의 비로 표현



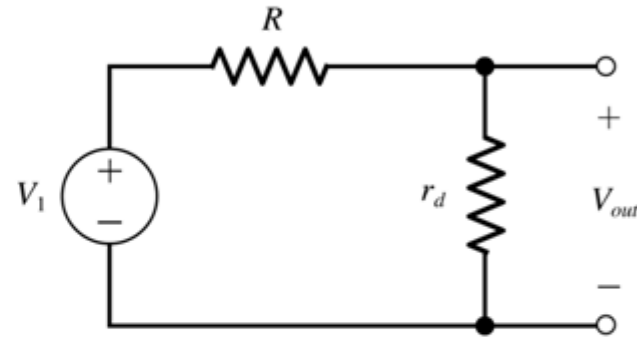
[그림 2-25] 다이오드의 동작점과 소신호 등가저항

다이오드의 소신호 등가회로

- 다이오드가 포함된 회로를 소신호 해석하는 경우



(a) 다이오드 회로



(b) 소신호 등가회로

[그림 2-26] 다이오드 회로와 소신호 등가회로

- 다이오드의 전류 - 전압 관계를 선형적인 관계로 다룰 수 있으므로, 비선형 소자인 다이오드를 선형소자인 것처럼 취급

다이오드의 소신호 등가회로

예제 2.4

다이오드의 바이어스 전류가 2 mA라고 가정할 때, (단, $V_T = 26 \text{ mV}$)

- (a) V_D 가 5 mV만큼 변할 때 다이오드 전류의 변화를 구하라.
- (b) I_D 의 15% 변화에 대한 V_D 의 변화를 구하고 설명하라.

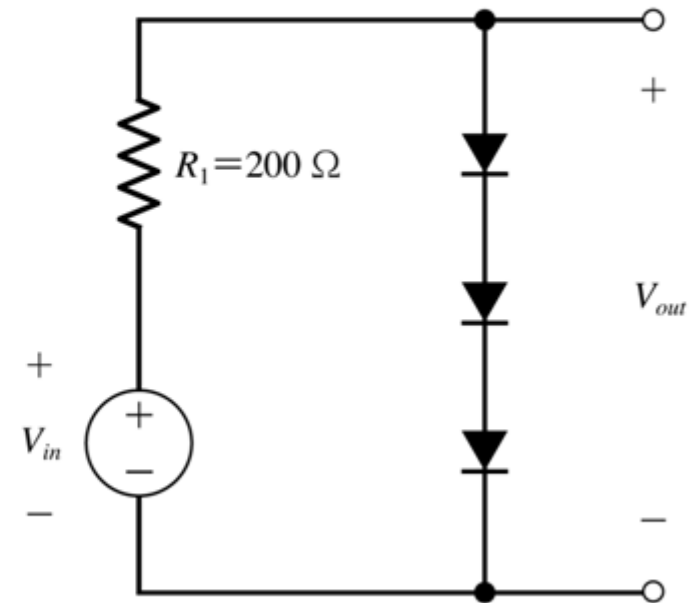


다이오드의 소신호 등가회로

예제 2.5

[그림 2-27]은 5 V의 DC 입력을 인가하여 2 V DC 전압을 생성하는 회로이다. 저항 $R_1=200\ \Omega$ 을 가정하여 다음 값을 구하라.

- (a) $V_{out}=2\text{ V}$ 가 되도록 하는 역방향 포화전류 I_S 은 얼마인가?
- (b) 입력이 200 mV 변했을 때 소신호 등가모델을 이용하여 해석하고, 출력전압의 변화를 구하라.



[그림 2-27]



다이오드 응용회로

□ 정류기

- 정류는 교류전압을 직류전압으로 변환하는 과정
- 정류기는 직류 전원 공급 장치
- 반파 정류기 또는 전파 정류기

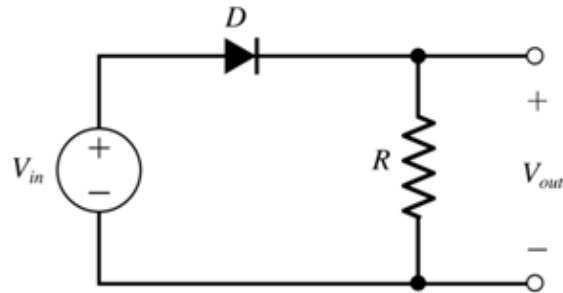
□ 반파 정류기

- 다이오드와 저항을 직렬로 연결하고 저항 양단에서 출력이 나오도록 하면 반파 정류기가 구성됨
- 한쪽 방향으로 전류를 흐르게 하고 반대 방향으로 전류를 차단하는 다이오드의 특성을 이용

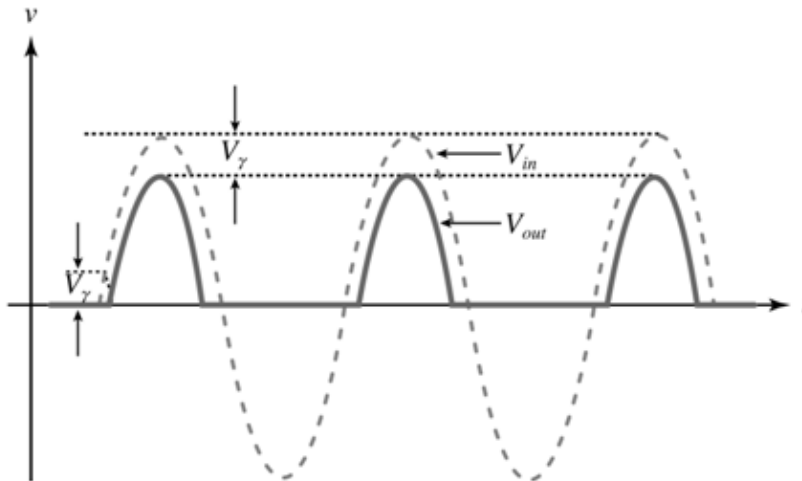
- $V_{in} \geq V_\gamma$ 이면, 다이오드는 도통이고, 출력전압은 $V_{out} = V_{in} - V_\gamma$
- $V_{in} < V_\gamma$ 이면, 다이오드는 개방이고, 출력전압은 $V_{out} = 0$

다이오드 응용회로

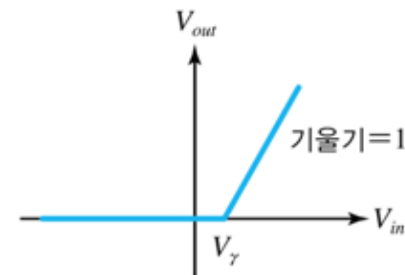
□ 정현파 입력에 대한 반파정류회로의 출력(양의 반주기)



(a) 반파 정류회로



(b) 입력 및 출력파형

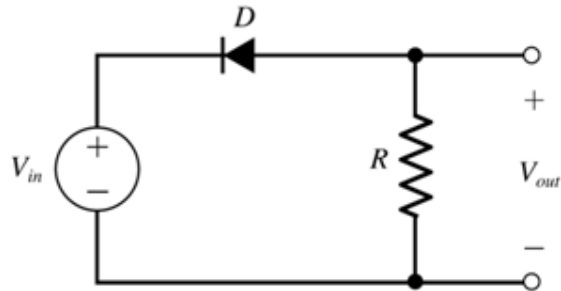


(c) 입출력 전달특성

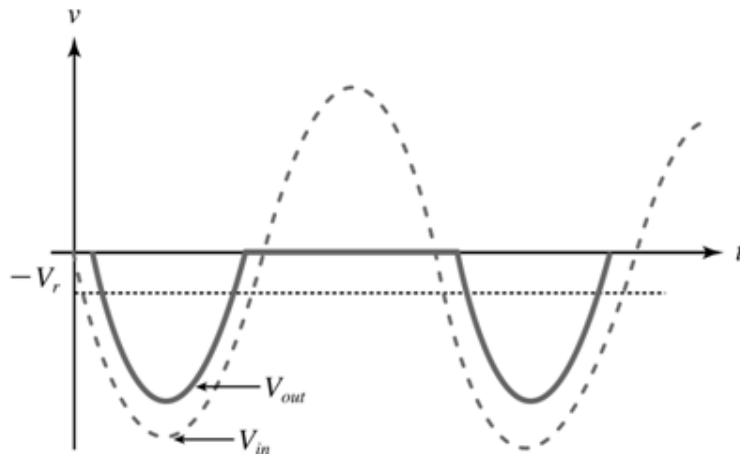
[그림 2-29] 양의 반 주기를 출력하는 반파 정류회로

다이오드 응용회로

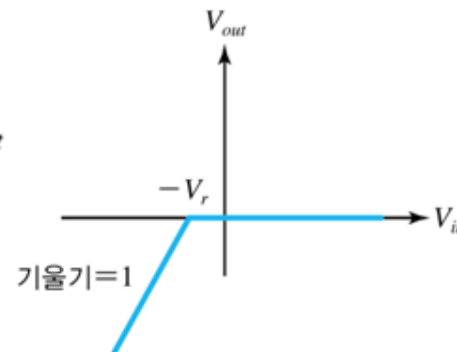
□ 정현파 입력에 대한 반파정류회로의 출력 (음의 반주기)



(a) 반파 정류회로



(b) 입력 및 출력파형

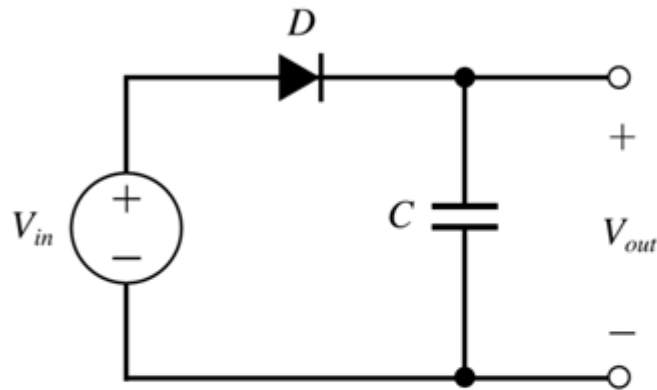


(c) 입출력 전달특성

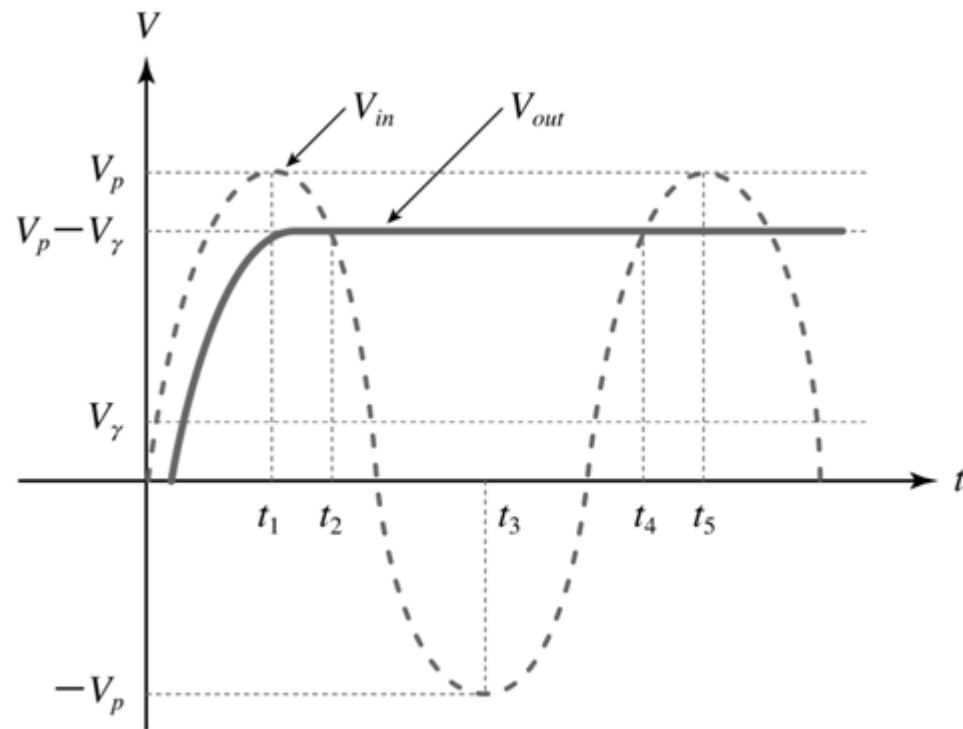
[그림 2-30] 음의 반 주기를 출력하는 반파 정류회로

다이오드 응용회로

□ 커패시터 필터링



(a) 반파 정류회로

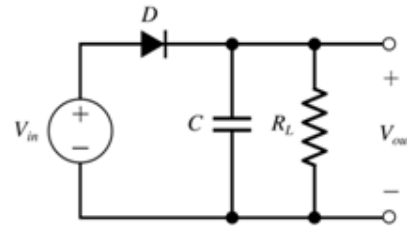


(b) 입력 및 출력파형

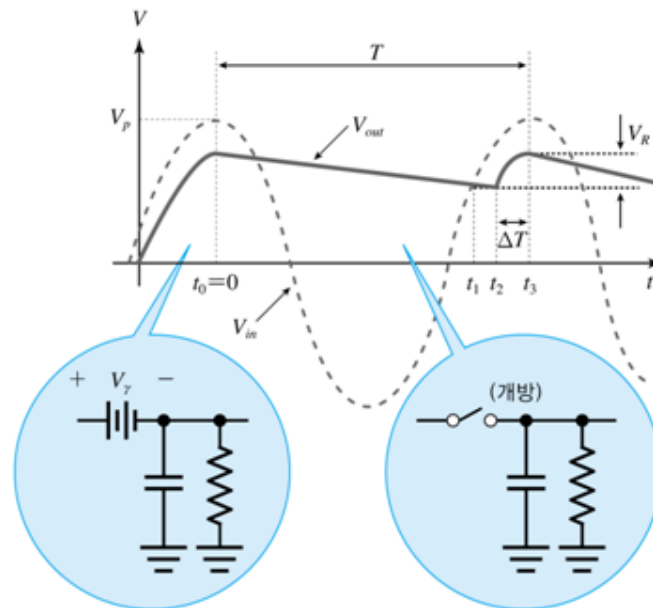
[그림 2-31] 커패시터 필터링을 갖는 반파 정류회로와 파형

다이오드 응용회로

□ R_L 이 캐패시터 C 에 병렬로 연결되어 있는 정류회로 동작



(a) 부하를 갖는 반파 정류회로



(b) 입력 및 출력파형

[그림 2-32] 부하저항 R_L 이 포함된 반파 정류회로와 파형

다이오드 응용회로

□ 리플의 크기 V_R 와 C값의 상관관계

- 리플 전압 V_R 은 $t_0 \leq t \leq t_2$ 에서 출력전압의 변동
- 입력전압이 최댓값 V_P 도달한 이후에 커패시터의 방전에 의한 출력전압 감소

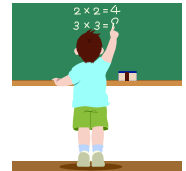
$$V_{out}(t) = (V_P - V_\gamma) e^{-\frac{t}{R_L C}} \quad (\text{단, } t_0 \leq t \leq t_2) \quad (2.29)$$

- $t_0 = 0$ 라고 가정하면

$$\begin{aligned} V_R &= V_{out}(0) - V_{out}(t_2) \\ &= (V_P - V_\gamma) - V_{out}(t_2) \end{aligned} \quad (2.30)$$

- 식 [2.29]로부터 $t = t_2$ 출력전압 $V_{out}(t_2)$ 을 [2.30]에 대입하면

$$\begin{aligned} V_R &= (V_P - V_\gamma) - (V_P - V_\gamma) e^{-\frac{t_2}{R_L C}} \\ &= (V_P - V_\gamma)(1 - e^{-\frac{t_2}{R_L C}}) \end{aligned} \quad (2.31)$$



다이오드 응용회로

- $t_2 \ll R_L C$ 라고 하면 $\frac{t_2}{R_L C} \ll 1$ 이므로 근사화를 적용

$$e^{-\frac{t_2}{R_L C}} \simeq 1 - \frac{t_2}{R_L C} \quad (2.32)$$

- 식 (2.32)의 근사화 결과를 식 (2.31)에 대입

$$\begin{aligned} V_R &\simeq (V_P - V_\gamma) \left[1 - \left(1 - \frac{t_2}{R_L C} \right) \right] \\ &= (V_P - V_\gamma) \frac{t_2}{R_L C} \end{aligned} \quad (2.33)$$

- 입력신호의 주기를 $T = t_3 - t_0$, $\Delta T = T - t_2$ 에 대해 $\Delta T \ll T$

$$t_2 \simeq T \quad (\text{단, } \Delta T \ll T) \quad (2.34)$$

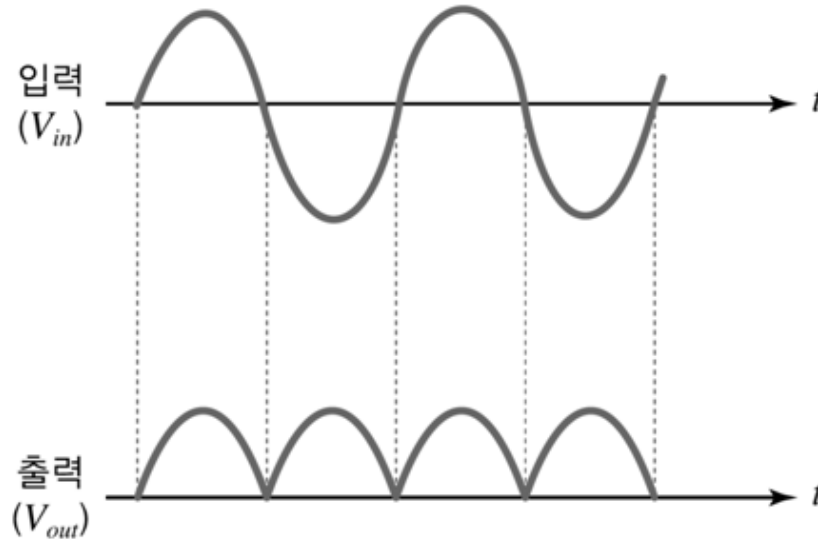
- 식 (2.34)를 식 (2.33)에 대입

$$V_R = \frac{(V_P - V_\gamma) T}{R_L C} = \frac{V_P - V_\gamma}{R_L C f_{in}} \quad (2.35)$$

다이오드 응용회로

□ 전파 정류기

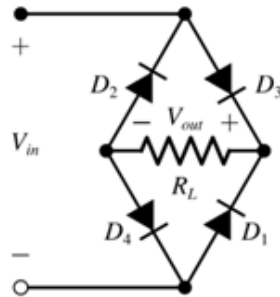
- 반파 정류기는 입력전압의 음의 반 주기 동안의 입력을 차단
- 반파 정류기는 한 주기 동안 커패시터가 방전되어 리플전압이 큼
커패시터의 시정수를 늘리더라도 리플의 크기를 줄이는데 한계가 있음
- 입력의 반 주기만 사용하는 반파 정류기와 달리, 전파 정류기는 입력의 음의 반주기를 양으로 반전시켜 양의 반 주기와 함께 출력하는 회로임



[그림 2-33] 정현파 입력의 전파 정류 출력파형

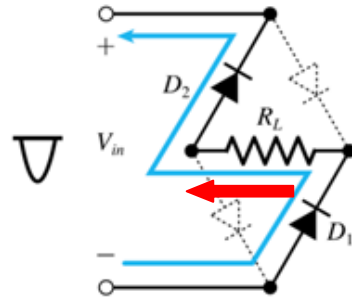
다이오드 응용회로

- 전파 정류기는 브릿지 회로 형태로 구현 가능



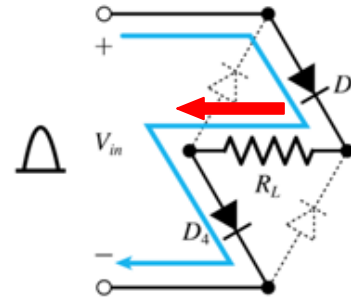
(a) 브릿지 전파 정류회로

[그림 2-34] 전파 정류회로와 동작



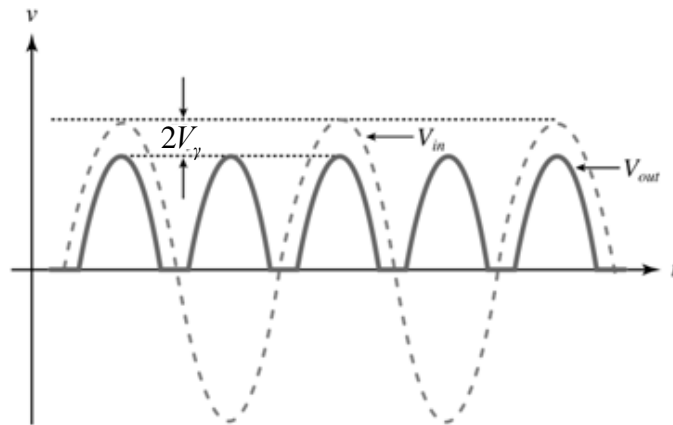
(b) 음의 반 주기 입력에 대한 전류 경로

$$V_{in} \leq -2V_\gamma$$



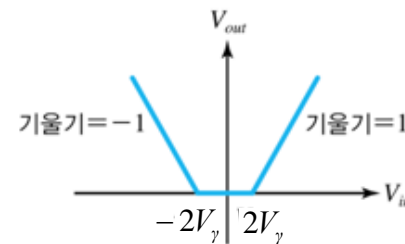
(c) 양의 반 주기 입력에 대한 전류 경로

$$V_{in} \geq 2V_\gamma$$



(a) 입력과 출력파형

[그림 2-35] 전파 정류회로의 정현파 입력에 대한 출력파형 및 전달특성

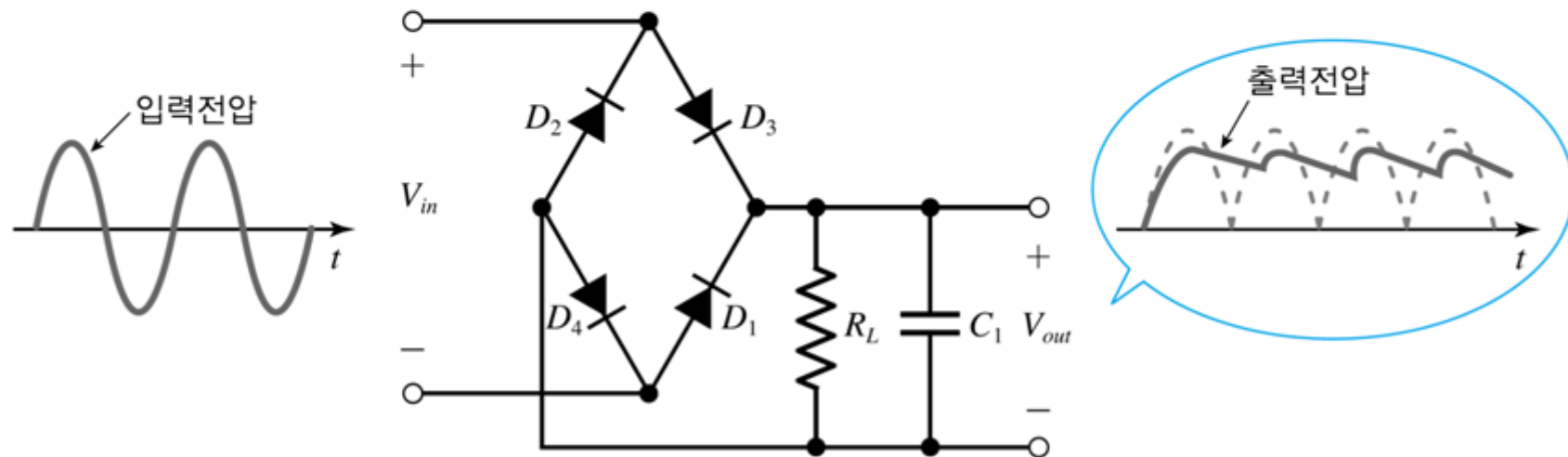


(b) 전달특성

다이오드 응용회로

□ 부하저항과 커패시터가 포함된 전파 정류회로

- 커패시터의 방전기간이 반주기 이하이기 때문에 리플의 크기가 반파 정류 회로의 약 $\frac{1}{2}$ 정도



[그림 2-36] 커패시터와 부하 저항을 포함하는 전파 정류회로와 입출력 파형

다이오드 응용회로

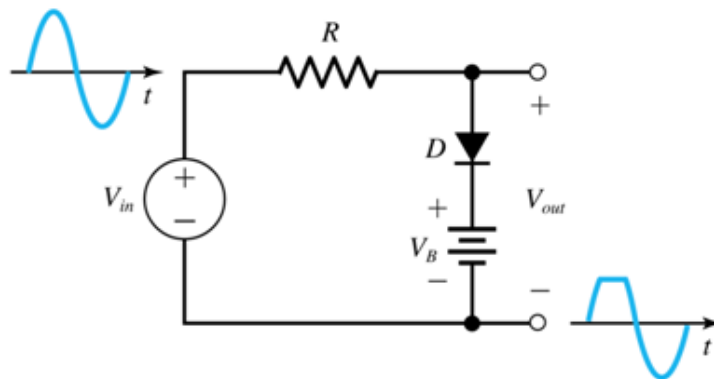
□ 리미터

- 교류신호의 진폭을 제한하거나 교류전압을 미리 정한 레벨로 제한하기 위해 사용되는 회로

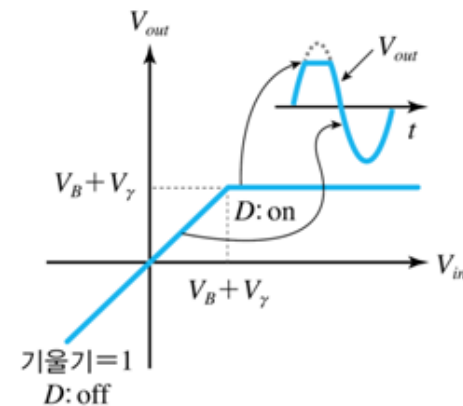
□ 양 리미터

- [그림 2-37(a)]는 양의 임계값으로 출력을 제한하는 양 리미터 회로
- $V_{in} \geq V_B + V_\gamma$ 이면 다이오드의 출력전압은 식 (2.39)으로 제한

$$V_{out} = V_\gamma + V_B \quad (2.39)$$



(a) 양 리미터 회로



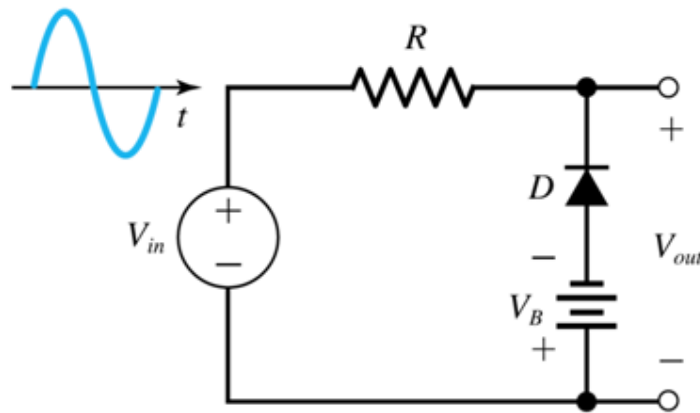
(b) 입출력 전달특성

[그림 2-37] 양 리미터 회로와 동작특성

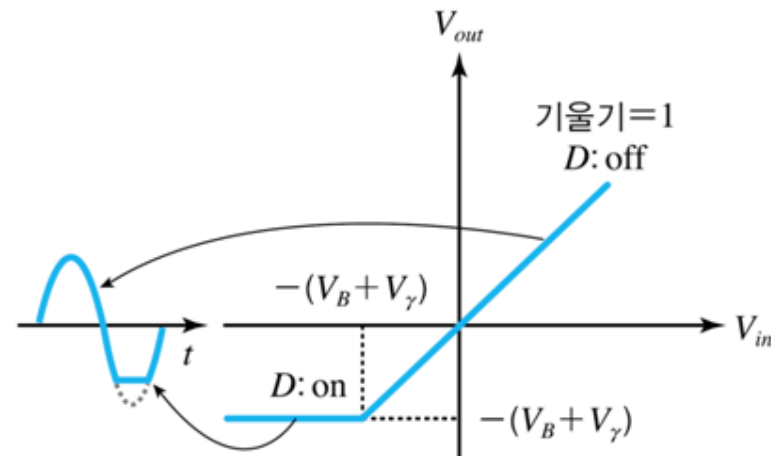
다이오드 응용회로

□ 음 리미터

- [그림 2-38(a)]는 출력을 음의 일정한 값으로 제한하는 음 리미터 회로
- $V_{in} \leq -(V_B + V_\gamma)$ 인 경우 다이오드의 출력 $V_{out} = -(V_B + V_\gamma)$ 으로 제한
- $V_{in} > -(V_B + V_\gamma)$ 인 경우에는 다이오드의 출력은 V_B 의 영향을 받지 않음



(a) 음 리미터 회로

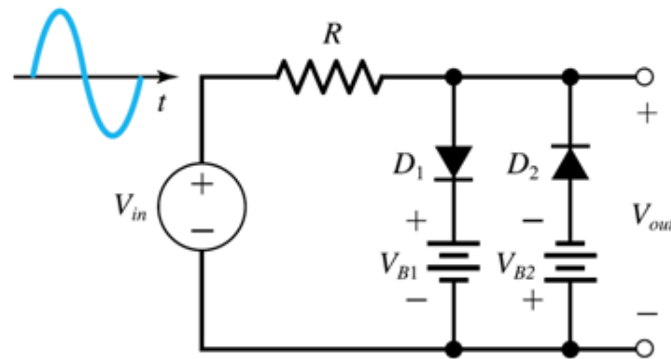


(b) 입출력 전달특성

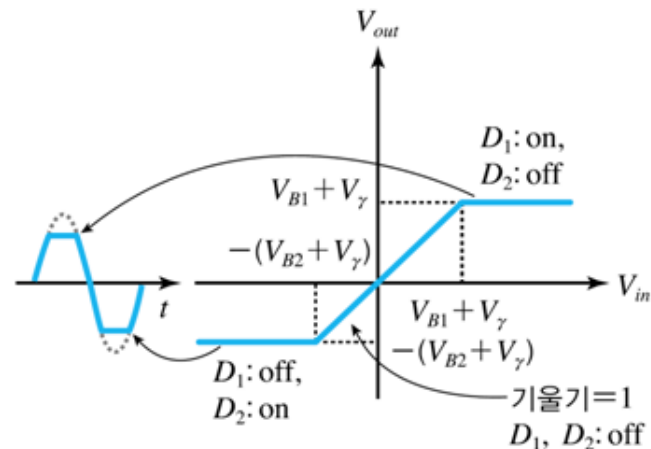
[그림 2-38] 음 리미터 회로와 동작특성

다이오드 응용회로

- [그림 2-37(a)]와 [그림2-38(a)]를 결합하여 [그림 2-39(a)]와 같이 회로를 구성
- 양의 값 음의 값 모두 제한하는 양방향 리미터 회로가 됨
- $V_{in} \geq V_{B1} + V_{\gamma}$ 이면 D_1 은 short되고 D_2 는 open되어 출력은 $V_{out} = V_{B1} + V_{\gamma}$
- $V_{in} \leq -(V_{B2} + V_{\gamma})$ 이면 출력은 $V_{out} = -(V_{B2} + V_{\gamma})$ 이 됨
- $-(V_{B2} + V_{\gamma}) < V_{in} < V_{B1} + V_{\gamma}$ 의 경우에는 $V_{out} = V_{in}$



(a) 양방향 리미터 회로



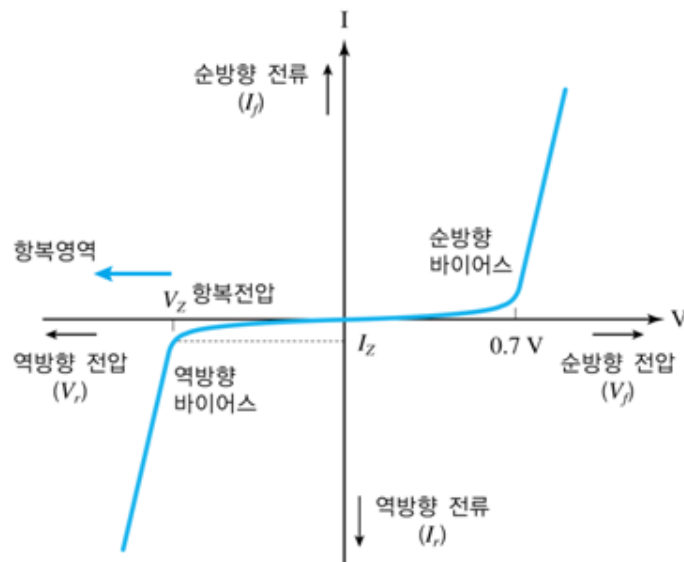
(b) 입출력 전달특성

[그림 2-39] 양방향 리미터 회로와 동작특성

제너다이오드와 그 응용

□ 제너다이오드의 특성

- 특정한 역방향 바이어스 영역에서 사용할 수 있도록 설계된 소자.
- 전류 - 전압 특성곡선 : [그림 2-45]참조
- 역방향 전류가 거의 흐르지 않다가 항복전압 근처에서 큰 전류가 흐르는 특성
- 전압과 부하 저항이 바뀌어도 부하 전압을 유지시켜주는 전압 조정기 또는 정전압 기준 회로의 기본 소자로 많이 사용

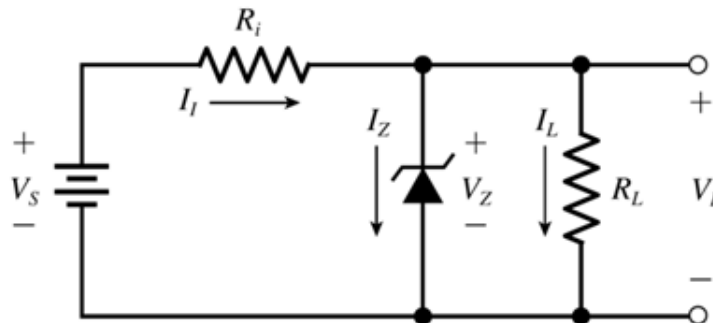


[그림 2-45] 제너다이오드 전류-전압 특성

제너다이오드와 그 응용

□ 전압 기준 회로

- [그림 2-46]은 제너다이오드를 이용한 전압 조정기 회로
- 출력 부하 저항 값이 넣은 범위에 걸쳐 변하거나, 입력 전압이 특정 범위에 걸쳐 변하더라도 출력 전압이 일정하게 유지



[그림 2-46] 제너다이오드를 이용한 전압 조정기 회로

- [그림 2-46]에서 부하 저항에 일정한 전압을 공급하기 위해 필요한 저항은 다음과 같이 결정

$$R_i = \frac{V_S - V_Z}{I_i} = \frac{V_S - V_Z}{I_Z + I_L} \quad (2.47)$$

제너다이오드와 그 응용

- 식 (2,52)를 다이오드 전류에 관하여 정리하면 식 (2,48)을 얻음

$$I_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_i} - I_L \quad (2.48)$$

- [그림 2-46] 회로가 동작하기 위해서는 제너다이오드가 항복영역에서 동작해야 하며, 기본적인 조건을 정리하면,

1. 부하 전류가 최대이고 입력전압이 최소일 때, 다이오드 전류는 최소값을 가진다.

$$\therefore I_{L,max} \ \& \ V_{S,min} \rightarrow I_{Z,min}$$

2. 부하 전류가 최소이고 입력전압이 최대일 때, 다이오드 전류는 최대값을 가진다.

$$\therefore I_{L,min} \ \& \ V_{S,max} \rightarrow I_{Z,max}$$

- 위의 조건 식 (2,47)에 대입하여 다음식을 얻음

$$R_i = \frac{V_{S,min} - V_Z}{I_{Z,min} + I_{L,max}} \quad (2.49)$$

$$R_i = \frac{V_{S,max} - V_Z}{I_{Z,max} + I_{L,min}} \quad (2.50)$$

제너다이오드와 그 응용

$$(V_{S,min} - V_Z) \times (I_{Z,max} + I_{L,min}) = (V_{S,max} - V_Z) \times (I_{Z,min} + I_{L,max}) \quad (2.51)$$

- 최소 제너전류를 최대 제너전류의 1/10으로 정하고 식 (2.51)에 $I_{Z,min} = 0.1I_{Z,max}$ 를 대입하면 제너다이오드의 최대 전류는 식 (2.52)가 됨

$$I_{Z,max} = \frac{I_{L,max}(V_{S,max} - V_Z) - I_{L,min}(V_{S,min} - V_Z)}{V_{S,min} - 0.1V_{S,max} - 0.9V_Z} \quad (2.52)$$

- 제너다이오드에서 소비되는 최대 전력은,

$$P_{Z,max} = I_{Z,max}V_Z \quad (2.53)$$

제너다이오드와 그 응용

예제 2.7

[그림 2-46]의 전압 조정기 회로가 10 V~12.5 V 범위에서 변하는 전원으로부터 부하에 $V_L=5$ V의 전압을 공급해야 한다. 부하전류가 0~50 mA 범위의 값을 갖는다고 가정하고, $I_{Z,min}=0.1I_{Z,max}$ 가 되도록 전압 조정기 회로를 설계하라. 또한 제너다이오드의 정격전력을 구하라.

