

ใบความรู้ที่ 2

การจำลองการทำงานไดโอด (Diode)

จุดประสงค์

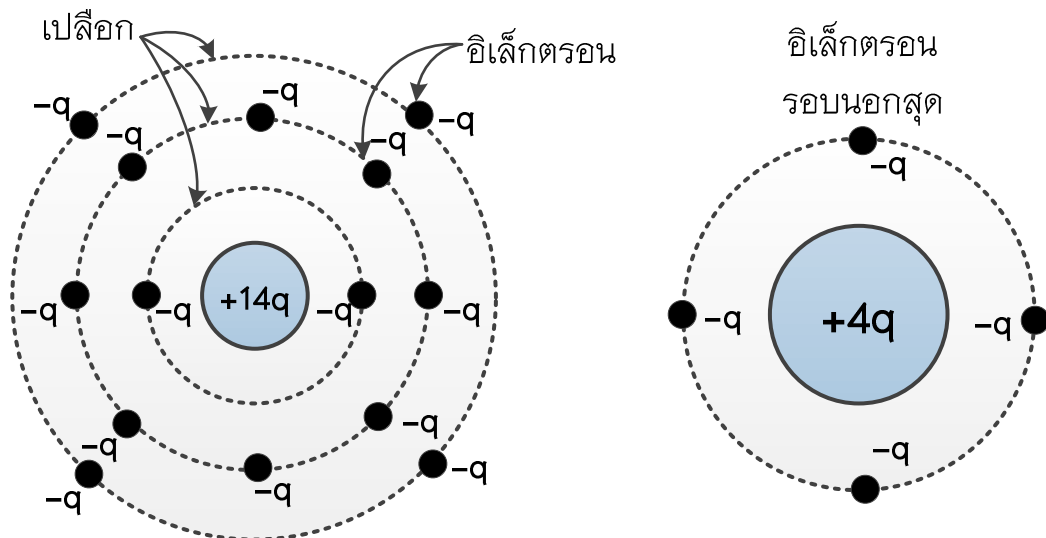
1. เพื่อให้ให้นักศึกษาเข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของไดโอด
2. สามารถจำลองการทำงานของไดโอดโดยโปรแกรม PSpice

ทฤษฎีเบื้องต้น

สารกึ่งตัวนำ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจและสำคัญมากชนิดหนึ่ง ทำจากผลึก (Crystal) เรียกว่า “สารกึ่งตัวนำ” หรือ “เซมิคอนดักเตอร์” (Semiconductor) จะทำหน้าที่เป็นตัวนำ (Conductor) หรือ ฉนวน (Insulation) ก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะที่แน่นอน

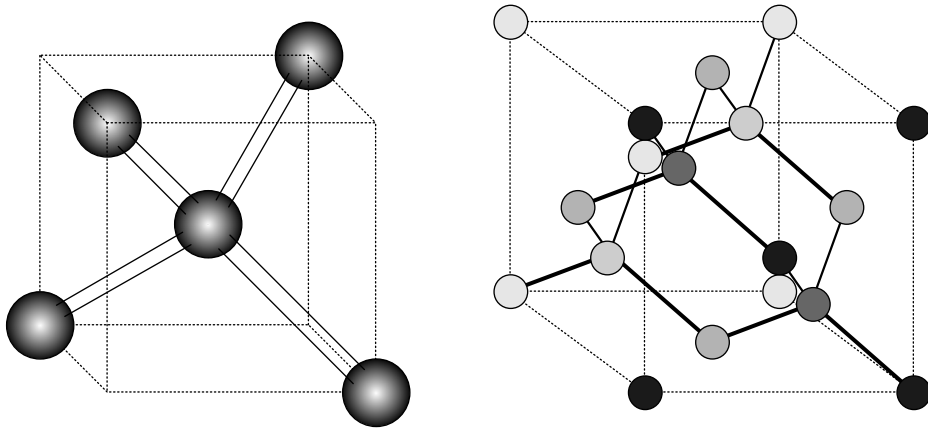
2.1 ซิลิกอน (Silicon)

ในโลกนี้มีสารกึ่งตัวนำแตกต่างกันหลายชนิด แต่ซิลิกอนซึ่งเป็นส่วนประกอบของทรานซิสเตอร์ที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมากที่สุด โดยอะตอมของซิลิกอนในเปลือกนอกสุด (Shell) จะมี 4 อิเล็กตรอน (แต่คล้ายกับมี 8 อิเล็กตรอน) สามารถเชื่อมต่อกับอีก 4 อิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง เรียกว่า อิเล็กตรอนร่วม (Share Electrons) โดยกลุ่มของอะตอมซิลิกอนจะรวมกลุ่ม (Share) อิเล็กตรอนของเปลือกนอกสุดจะเกาะ (Form) กันเป็นรูปของผลึก (Crystal)



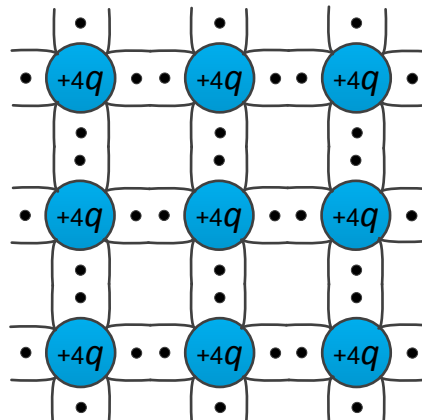
รูปที่ 2.1 อะตอมของซิลิกอน

เราเรียกอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุดนี้ว่า “วาเลนซ์อิเล็กตรอน” (Valence Electron) นอกจากนี้อิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ในวงโคจรชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองของอะตอมมีความเสถียรมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อไปนี้เราจะแสดงอะตอมของซิลิกอนในรูปแบบของนิวเคลียสเสมือน และเพื่อให้ดูง่ายขึ้นเราจึงแสดงเฉพาะอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่านั้น



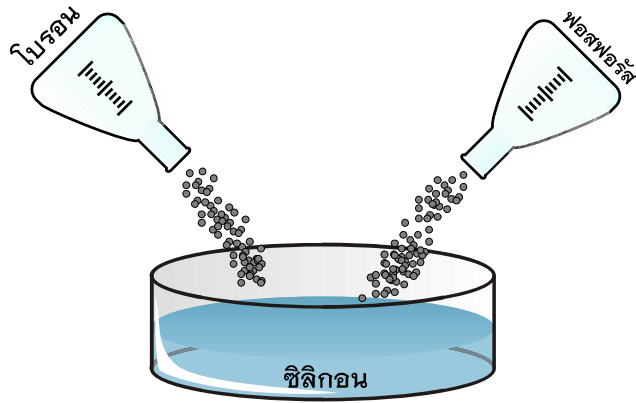
รูปที่ 2.2 ผลึกของซิลิกอน

ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ภายในผลึกของซิลิกอนที่บริสุทธิ์ อะตอมของซิลิกอนแต่ละตัวจะจับตัวกับอะตอมที่อยู่รอบๆ ตัวมันอีก 4 ตัว ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมมีครบ 8 ตัว ทั้งนี้การยึดเกาะระหว่างอะตอมจะเป็นไปอย่างมีระเบียบและแข็งแรง



รูปที่ 2.3 เพื่อให้ดูง่ายขึ้นเราจึงแสดงภาพเสมือน 2 มิติของโครงสร้างซิลิกอนบริสุทธิ์โดยมีเฉพาะอิเล็กตรอนวงนอกสุด

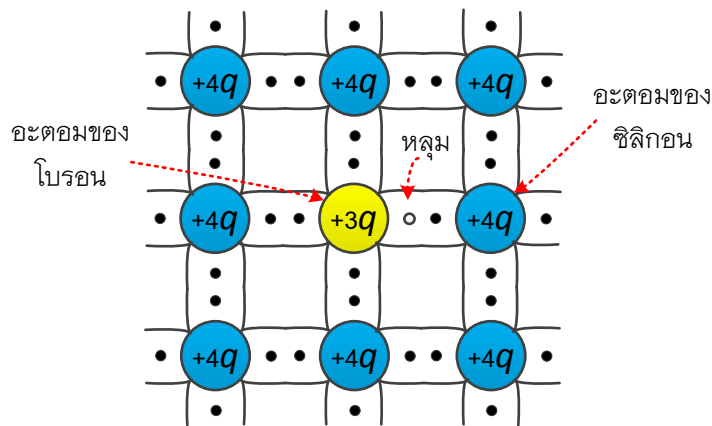
โดยปกติแล้วซิลิกอนบริสุทธิ์ ไม่ค่อยมีประโยชน์มากนัก ดังนั้นผู้ผลิตจึงเพิ่มส่วนผสมอย่างเข้มข้นในการปรุงแต่งซิลิกอน ด้วยการผสมด้วยฟอสฟอรัส (Phosphorus) โบรอน (Boron) หรืออย่างอื่น กระบวนการอย่างนี้เราจะเรียกว่าการ “โด๊ป” (Doping) ซิลิกอน โดยผลึกซิลิกอนที่ถูกโด๊ปแล้ว มีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่ออิเล็กทรอนิกส์มาก



รูปที่ 2.4 การได้ปซิลิกอน

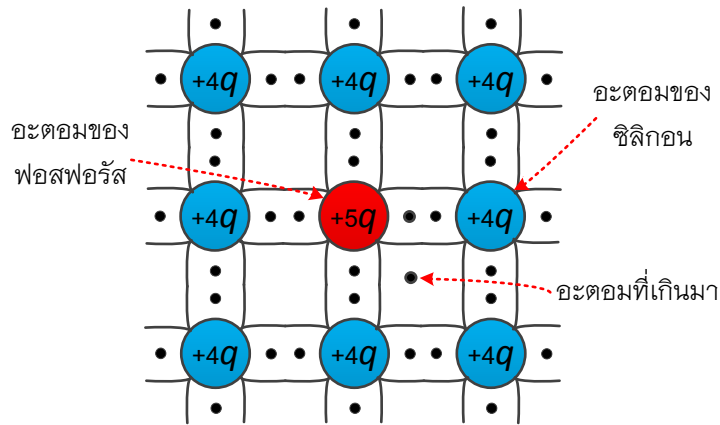
โดยการได้ปสาร โบรอน ฟอสฟอรัส และอะตอมชนิดอื่นๆ สามารถร่วม (Join) กับอะตอมซิลิกอนจับเป็นรูปของผลึก โดยการจับตัวกันของอะตอมจะเป็นดังนี้ อะตอมของโบรอนจะมี 3 อิเล็กตรอนอยู่ที่เปลือกนอก อะตอมของฟอสฟอรัสจะมี 5 อิเล็กตรอนอยู่ที่เปลือกนอก โดยซิลิกอนใดที่มีอิเล็กตรอนพิเศษของฟอสฟอรัส เรียกว่า แบบ N (N-Type) (N: Negative) ซิลิกอนใดที่มีอิเล็กตรอนพิเศษของโบรอนเราจะเรียกว่า แบบ P (P-Type) (P: Positive)

ซิลิกอนแบบ P (P-Type Silicon) อะตอมของโบรอนในกลุ่มของอะตอมซิลิกอน จะมีอิเล็กตรอนว่างอยู่ที่เรียกว่า “หลุม (Hole)” จะมีโอกาสให้อิเล็กตรอนข้างเคียงตกลงไปในหลุม ดังนั้นหลุมจะเคลื่อนที่ ไปยังตำแหน่งใหม่ได้ หลุมสามารถเคลื่อนที่ผ่านอะตอมของซิลิกอนได้ คล้ายพองน้ำในอากาศ



รูปที่ 2.5 ซิลิกอนแบบ P

ซิลิกอนแบบ N (N-Type Silicon) อะตอมของฟอสฟอรัสในกลุ่มของอะตอมของซิลิกอนจะบริจาคอิเล็กตรอนพิเศษ ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอะตอมซิลิกอนอย่างง่ายตาย หรือ อาจจะสามารถกล่าวได้ว่า ซิลิกอนแบบ P นำกระแสไฟฟ้า

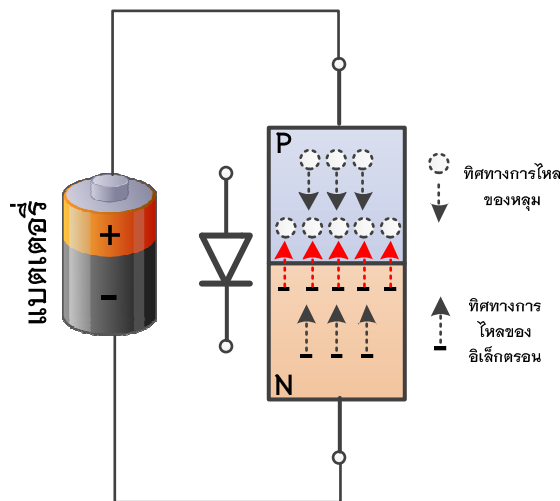


รูปที่ 2.6 ซิลิกอนแบบ N

2.2 ไดโอด (Diode)

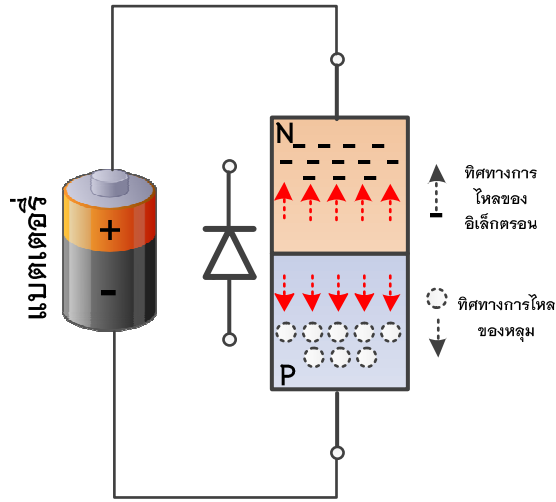
ทั้งซิลิกอนแบบ P และแบบ N จะนำกระแสไฟฟ้าได้ ความต้านทานของซิลิกอนทั้งสองแบบจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของหลุมและอิเล็กตรอนส่วนเกิน ดังนั้นซิลิกอนทั้งสองชนิดจึงทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานด้วย และจะนำกระแสไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

โดยการประกอบซิลิกอนแบบ P กับชั้นซิลิกอนแบบ N อิเล็กตรอนจะไหลผ่านซิลิกอนได้เพียงทิศทางเดียว (One-Direction) ซึ่งเป็นหลักการของไดโอด โดยรอยต่อที่รอยต่อ P กับ N นั้นเราจะเรียกว่า “รอยต่อ PN” (PN Junction)



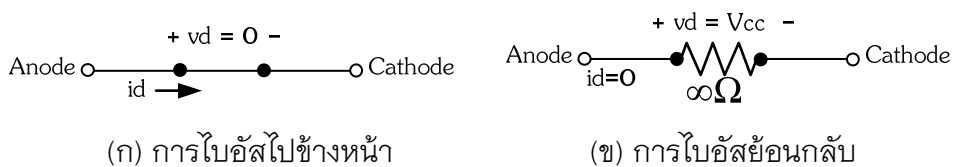
รูปที่ 2.7 ฟอว์เวิร์ดไบอัส

หลักการทำงานของฟอว์เวิร์ดไบอัสของไดโอด คือ ประจุจากแบตเตอรี่จะผลักดันหลุมและอิเล็กตรอน ไปข้างหน้ารอยต่อหรือจังก์ชัน ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า 0.6 โวลต์ อิเล็กตรอนจะกระโดดข้ามรอยต่อเพื่อไปรวมกับหลุม ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้



รูปที่ 2.8 รีเวิร์สไบอัส

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิด P และ ชนิด N มาต่อร่วมกันทำให้เกิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองเกิดขึ้น ในการที่เราจะทำให้ไดโอดทำงานนั้น เราจำเป็นต้องกำหนดแรงดันให้กับสารกึ่งตัวนำค่าหนึ่งให้กับสารกึ่งตัวนำทั้งสองซึ่งเราเรียกรูปแบบนี้ว่าการไบอัส (Bias) โดยถ้าแรงดันที่ขา Anode (สารกึ่งตัวนำชนิด P) มีค่าแรงดันสูงกว่าหรือเท่ากับขา Cathode (สารกึ่งตัวนำชนิด N) แล้ว ก็จะทำให้ไดโอดสามารถที่จะนำกระแสไฟฟ้าได้ โดยการป้อนแรงดันให้กับไดโอดเพื่อให้ไดโอดนำกระแสในลักษณะนี้เราจะเรียกว่าการไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) ซึ่งในทางอุดมคติแล้วไดโอดที่ได้รับการไบอัสไปข้างหน้าจะทำให้ตัวไดโอดเปรียบเสมือนเส้นลวดเส้นหนึ่งที่ไม่มีความต้านทานอยู่ในตัวอยู่เลย (ซึ่งอาจจะบ้างแต่ถือว่าน้อยมาก) ในทางกลับกันถ้าเรากำหนดให้ขา Cathode มีแรงดันที่สูงกว่าขา Anode ตัวไดโอดจะไม่สามารถนำกระแสได้โดยการป้อนแรงดันในลักษณะนี้เราจะเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) โดยในทางอุดมคติแล้วไดโอดที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับนั้นจะส่งผลทำให้ไดโอดทำตัวเปรียบเสมือนว่ามีความต้านทานที่มีค่ามากๆ ทำให้กระแสไม่สามารถที่จะไหลผ่านตัวไดโอดได้



รูปที่ 2.9 แบบจำลองคุณสมบัติของไดโอดทางอุดมคติ

โดยทั่วไปตามธรรมชาติของไดโอดจะบรรจุอยู่ในหลอดแก้วรูปทรงกระบอกเล็กๆ แถบคาตลิสต์จะเป็นสารซิลิกอนชนิด N ซึ่งเราจะเรียกมันว่าขั้วคาโทด (Cathode) ด้านตรงกันข้ามจะเป็นขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งจะเป็นสารซิลิกอนแบบ P

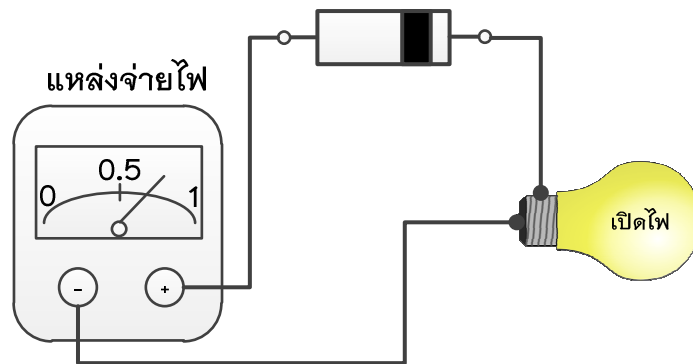


(ก) รูปทั่วไปของไดโอด (ข) สัญลักษณ์ของไดโอด

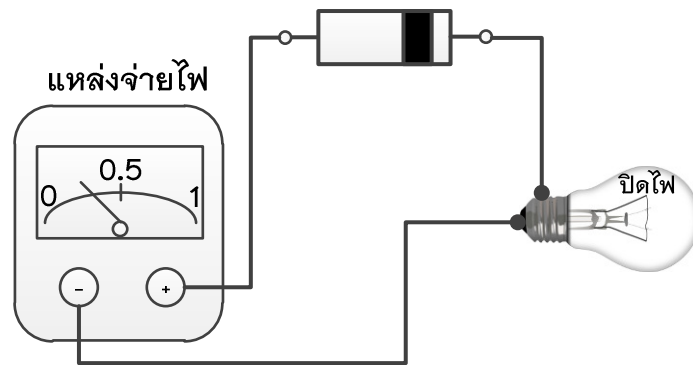
รูปที่ 2.10 ไดโอด

เราทราบกันดีอยู่แล้วว่าไดโอด คือ ประตูลิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางเดียว แต่มีคุณสมบัติที่สำคัญเพิ่มเติมบางอย่างของไดโอด ดังนี้

- ไดโอดจะไม่นำกระแสจนกว่าแรงเคลื่อนฟอร์เวิร์ด (Forward Voltage) ขึ้นถึงระดับเทรชโฮลด์ (Threshold) สำหรับซิลิกอนไดโอดนั้น แรงเคลื่อนจะอยู่ประมาณ 0.6 โวลต์



(ก) ระดับแรงดันเกินระดับเทรชโฮลด์

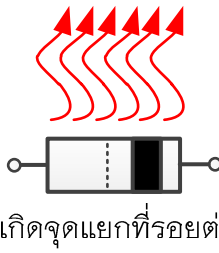


(ข) ระดับแรงดันไม่ถึงระดับเทรชโฮลด์

รูปที่ 2.11 การทำงานของไดโอดในกรณีจ่ายแรงดันฟอร์เวิร์ด

- ถ้ากระแสฟอร์เวิร์ดไหลมากเกินไป ไดโอดจะแตกหรือละลาย และหน้าสัมผัสจะแยกออกจากกัน และถ้าหากไดโอดละลาย มันจะนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้ไดโอดร้อนมาก อาจจะมีไอร้อนเกิดขึ้นที่ตัวไดโอด

ไดโอดเกิดความร้อน

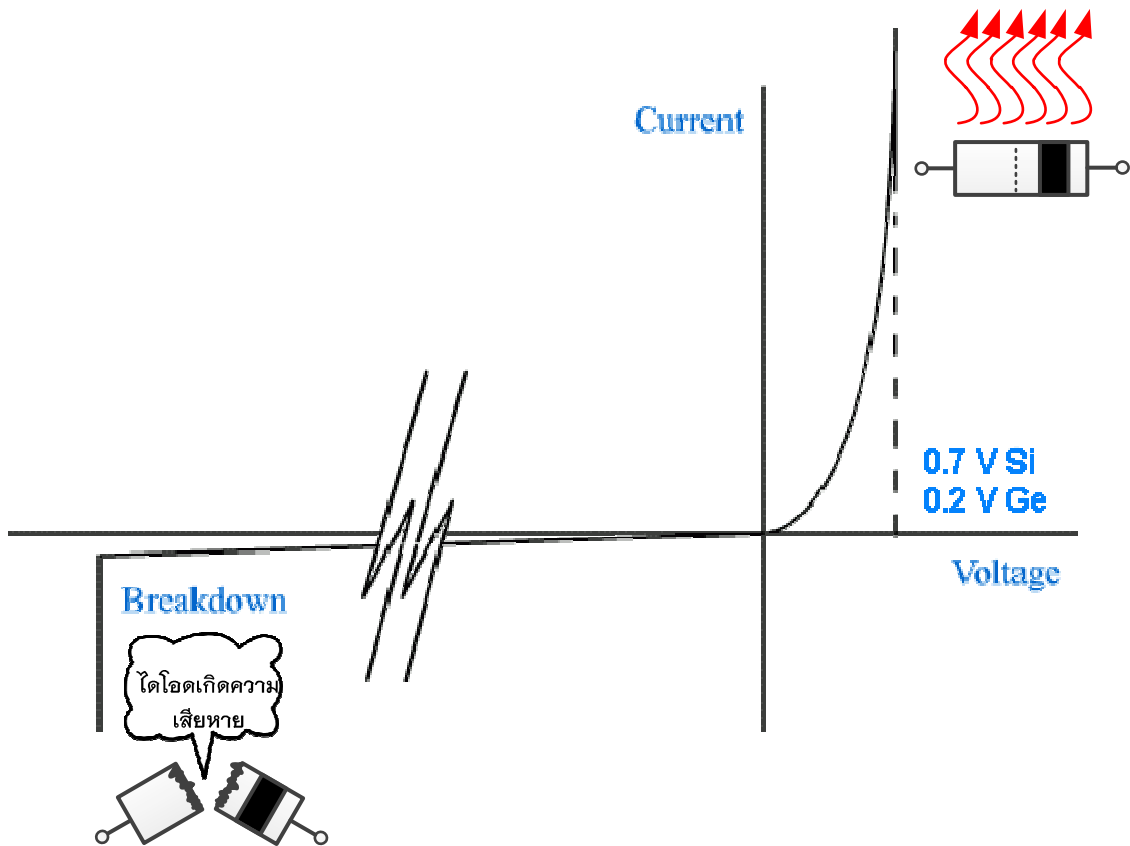


รูปที่ 2.12 กระแสฟอว์เวิร์ดมากเกินไป

- ถ้าหากมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Reverse Voltage) สูงเกินไปจะทำให้ไดโอดนำกระแสผิดทิศทาง ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้สูงพอ จะทำให้กระแสเพิ่มขึ้นทันทีทันใด อาจจะทำให้ไดโอดระเบิดได้

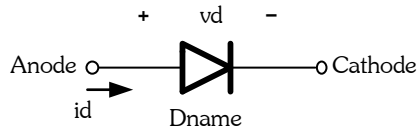


รูปที่ 2.13 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมากเกินไป



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการทำงานของไดโอด

2.3 การจำลองการทำงานของไดโอดด้วย PSpice



รูปที่ 2.15 สัญลักษณ์ของไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในโปรแกรม PSpice นั้น จะมีชื่อขึ้นต้นตัวอุปกรณ์ คือ D แล้วตามด้วยเบอร์อุปกรณ์ โดยการเรียกใช้งานไดโอดใน PSpice จะสามารถเรียกใช้งานได้ทั้งหมด 2 วิธีด้วยกัน คือ

- การเรียกชื่อเบอร์ไดโอดตรงๆ เช่น D1N4148, D1N4002 และ D1N914 เป็นต้น
- วิธีที่สองคือการกำหนดโมเดลหรือการสร้างตัวไดโอดขึ้นมาใหม่ด้วยวิธีการกำหนดคุณสมบัติ

ตามที่เราต้องการโดยการกำหนดพารามิเตอร์ลงในโมเดลของไดโอดเบอร์ Dbreak โดยมีรูปแบบคำสั่งคือ

.Model diode_model_name D(parameter_name=value ...)

โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอด ในการศึกษาการทำงานของไดโอดด้วยโปรแกรม PSpice เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของไดโอด

สัญลักษณ์	ชื่อ	พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่กำหนด
I_s	IS	ค่ากระแสอิ่มตัว	A	1.0E-14
r_s	RS	ค่าความต้านทาน	Ω	0
n	n	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อย	-	1
V_{zk}	BV	ค่าแรงดันย้อนกลับ	V	∞
I_{zk}	IBV	ค่ากระแสที่แรงดันย้อนกลับ	A	1.0E-3

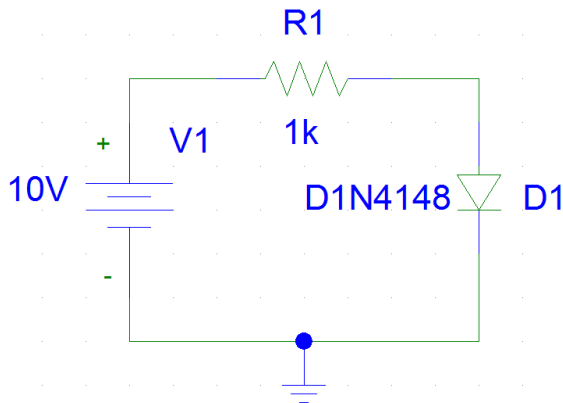
โดยค่าต่างๆ ตามตารางที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_d = I_s \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

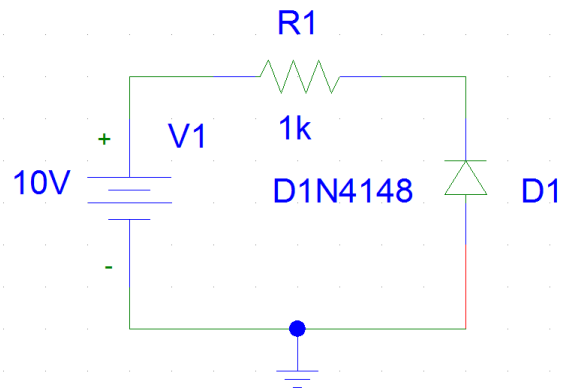
n จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อไดโอดทำมาจากสารซิลิกอน (Si) และมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อไดโอดทำมาจากสารเจอร์เมเนียม (Ge)

V_T คือค่าแรงดันเชิงอุณหภูมิ

ตัวอย่าง จากวงจรรูปที่ 2.16 (ก) และ รูปที่ 2.16 (ข) จงหาค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเบอร์ 1N4148



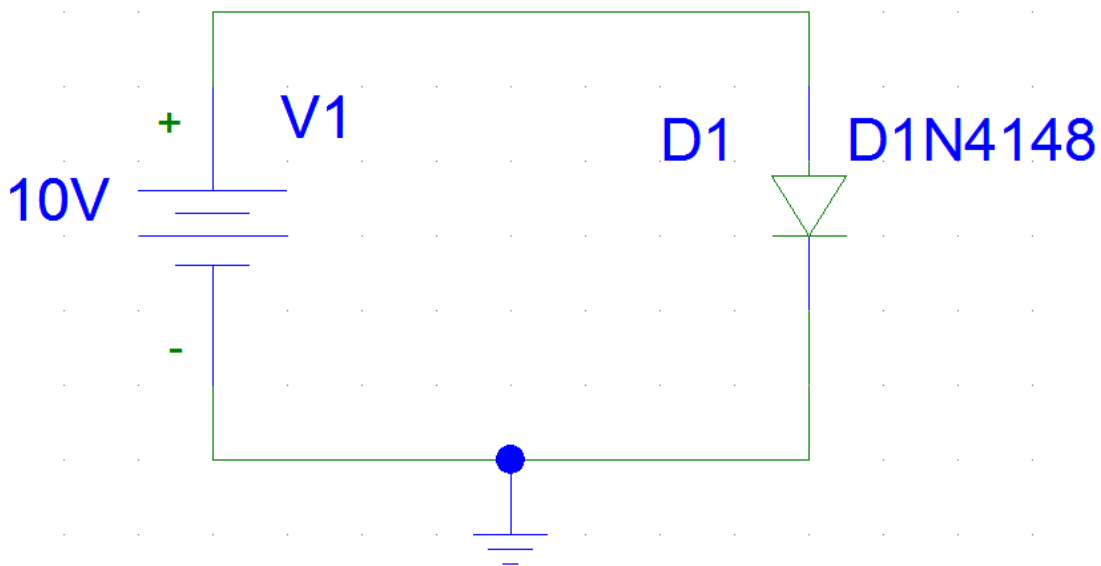
รูปที่ 2.16 (ก)




รูปที่ 2.16 (ข)

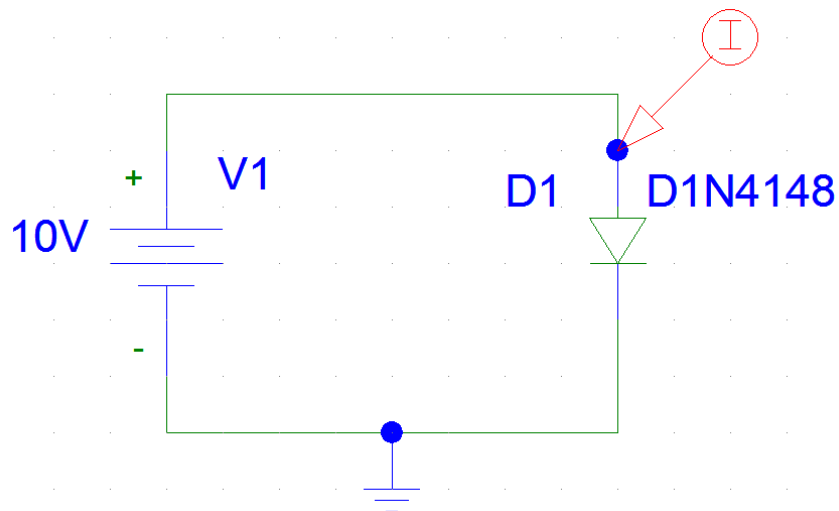
หมายเหตุ อุปกรณ์ไดโอดที่ Part Browser Advance จะขึ้นต้นด้วยอักษร d

ตัวอย่าง จากวงจรไดโอดดังรูป 2.17 จงวาดกราฟคุณลักษณะทางไฟตรงของไดโอดเบอร์ 1N4148 ในทางปฏิบัติ




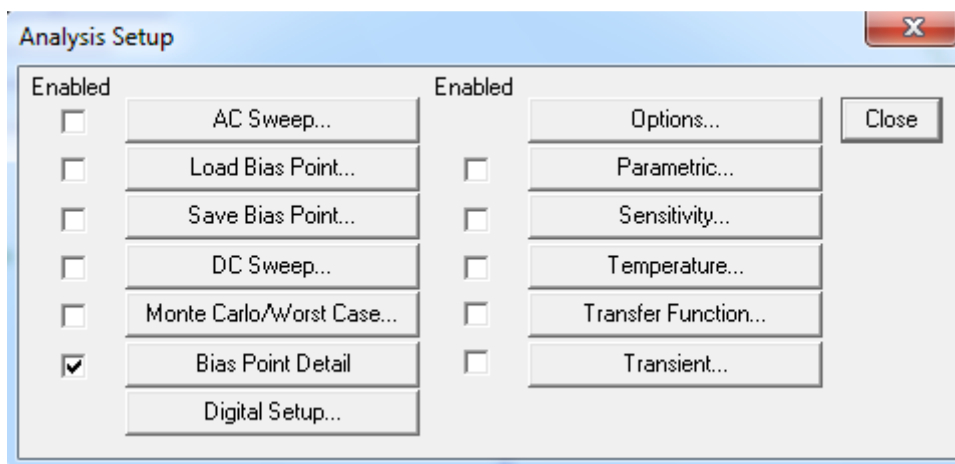
รูปที่ 2.17

1. จากใบงานที่ 1 ให้นักศึกษาทำการเรียกอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 2.17 และวาดรูปวงจрдังกล่าว
2. เมื่อวาดรูปวงจรสเสร็จแล้ว ทำการกำหนดค่าต่างๆ ให้ถูกต้อง จากนั้นให้คลิกที่ไอคอน  Current Maker โพรบวัดกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาวัดกระแสก่อนที่จะเข้าไดโอดเบอร์ 1N4148 ดังรูปที่ 2.18



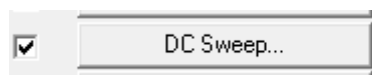
รูปที่ 2.18

3. จากนั้นให้ทำการคลิกที่ปุ่ม  **Setup Analysis** เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรมจะทำการเรียกหน้าต่างดังรูปที่ 2.19 ขึ้นมา

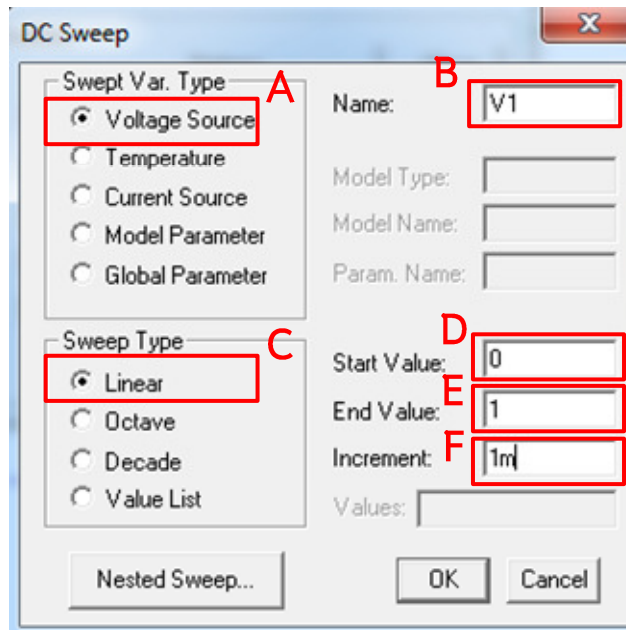


รูปที่ 2.19

4. ทำการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ห้วงจร โดยทำการเลือกแบบ DC Sweep ซึ่งในการเลือกในลักษณะนี้ ตัวโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ห้วงจรและจะแสดงค่ากระแสและค่าแรงดันทุกจุดในวงจรและจุดที่เราต้องการได้ โดยโปรแกรมจะทำการเปิดหน้าต่าง DC Sweep ดังรูปที่ 2.21 ขึ้นมา



รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.21

5. จากนั้นให้คลิกเข้าไปเซตค่าตามรูปที่ 2.21 ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์วงจร โดยมีจุดที่เราต้องทำความเข้าใจทั้งหมดอยู่ 6 จุดด้วยกัน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

ที่จุด A เป็นการกำหนดชนิดของแหล่งจ่าย โดยในที่นี้วงจรของเราได้ใช้แหล่งจ่ายเป็นแรงดัน ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกเป็น Voltage Source

ที่จุด B เป็นชื่อของแหล่งจ่าย โดยในที่นี้วงจรของเราได้ตั้งชื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็น V1 ดังนั้นเราจึงใส่ชื่อเป็น V1

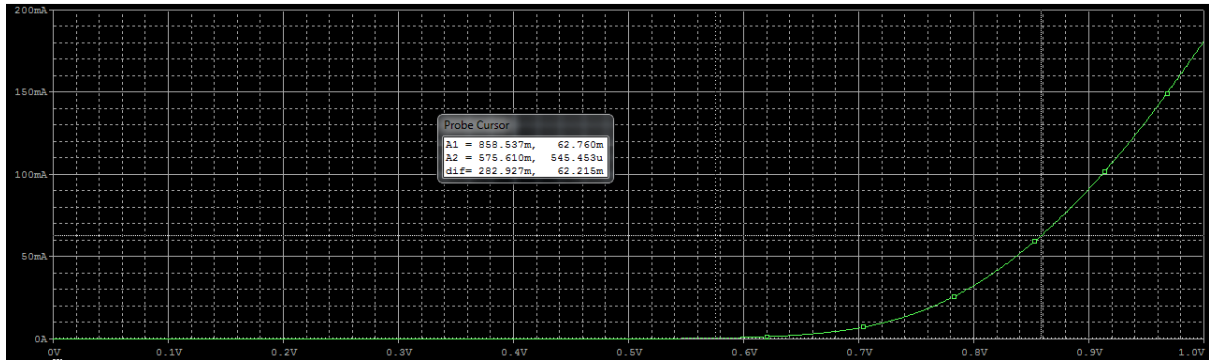
ที่จุด C เป็นการกำหนดลักษณะของกราฟ โดยเลือกแบบกราฟเชิงเส้น (Linear)

ที่จุด D เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของแหล่งจ่าย โดยเราทำการกำหนดให้เริ่มต้นที่ 0 โวลต์

ที่จุด E เป็นการกำหนดค่าสุดท้ายของแหล่งจ่าย โดยเราทำการกำหนดให้สิ้นสุดที่ 1 โวลต์

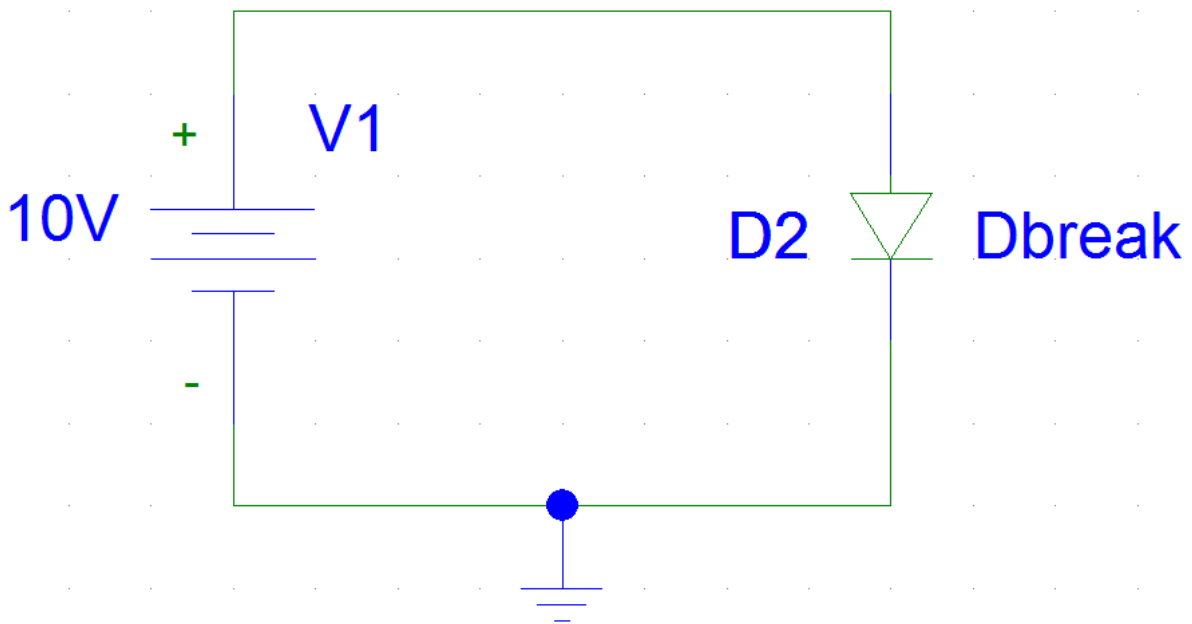
ที่จุด F เป็นการกำหนดสเกลการเพิ่มขึ้นของแรงดัน โดยเราจะทำการกำหนดให้แรงดันทำการเพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิโวลต์

6. เมื่อกำหนดค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ก็สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ห้วงจรได้ โดยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 2.22 ซึ่งกราฟจะแสดงคุณลักษณะของไดโอดที่เราได้ทำการทดสอบ




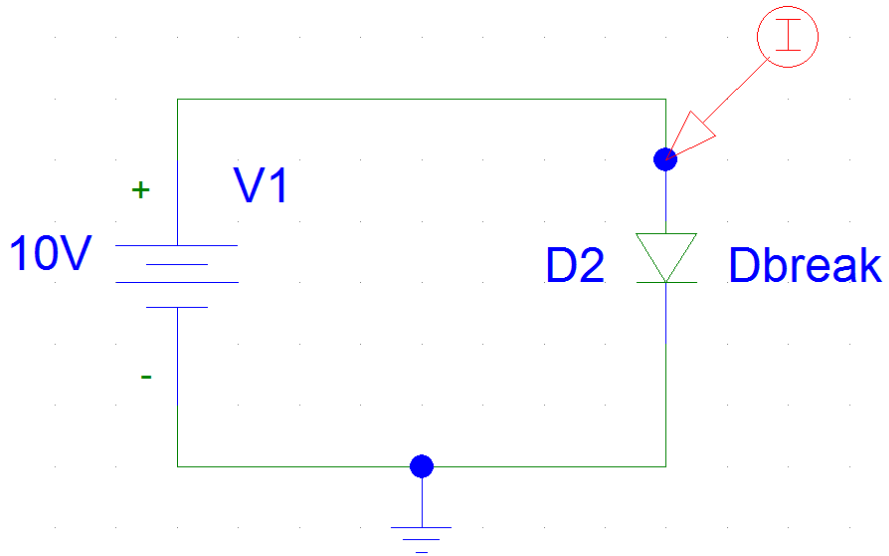
รูปที่ 2.22

ตัวอย่าง จากรูปที่ 2.23 กำหนดให้ไดโอดเป็นไดโอดในทางปฏิบัติโดยมีค่า $I_s = 100\text{pA}$, $r_s = 50\Omega$, และ $n = 1.679$ จงวาดกราฟคุณลักษณะโพลตรงของไดโอดในทางปฏิบัตินี้



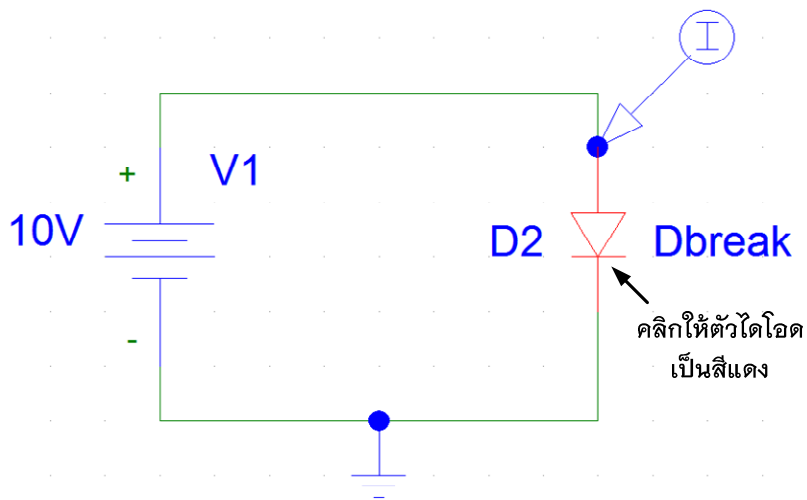
รูปที่ 2.23

1. จากรูปที่ 2.23 นั้นจะคล้ายกับรูปที่ 2.17 โดยส่วนที่แตกต่างก็คือตัวไดโอด โดยให้เราเลือกไดโอด Dbreak ออกมา ซึ่งไดโอด Dbreak จะสามารถกำหนดค่าภายในได้
2. จากนั้นให้คลิกที่ไอคอน  Current Maker โพรบวัดกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาวัดกระแสก่อนที่จะเข้าไดโอด Dbreak ดังรูปที่ 2.24

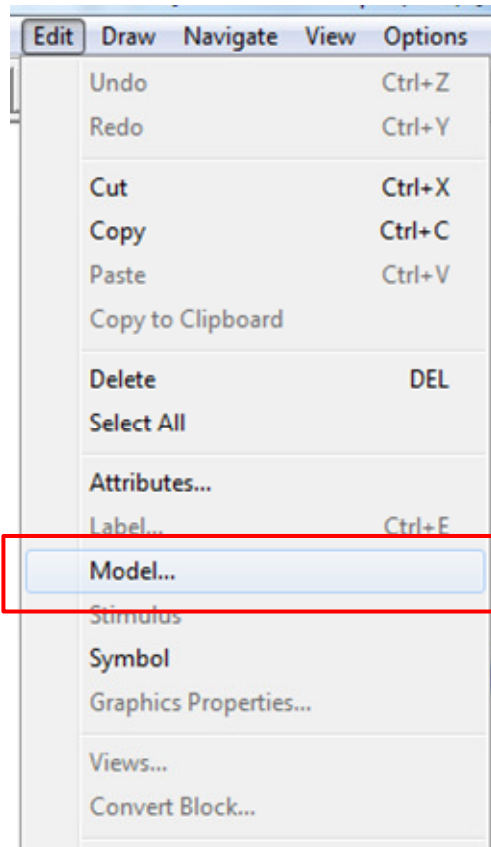


รูปที่ 2.24

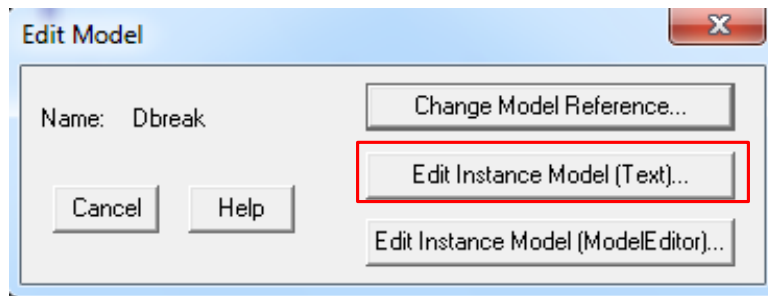
3. เมื่อวาดเชื่อมต่อวงจรเรียบร้อยแล้วจากนั้นให้ทำการเซฟ ก่อนที่จะทำตามขั้นตอนต่างๆ ให้กับไดโอด ตามรูปที่ 2.25, 2.26 และ 2.27 เรียงตามลำดับ เพื่อจะทำการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับไดโอด



รูปที่ 2.25 เลือกตัวไดโอด

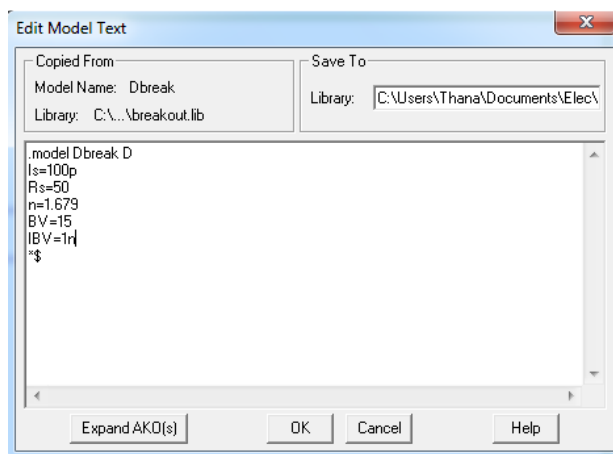


รูปที่ 2.26 เลือก Edit -> Model



รูปที่ 2.27 คลิกปุ่ม Edit Instance Model (Text)...

4. ทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ของไดโอดดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28

โดยที่

I_s คือ ค่ากระแสอิ่มตัว มีค่าเท่ากับ 100pA

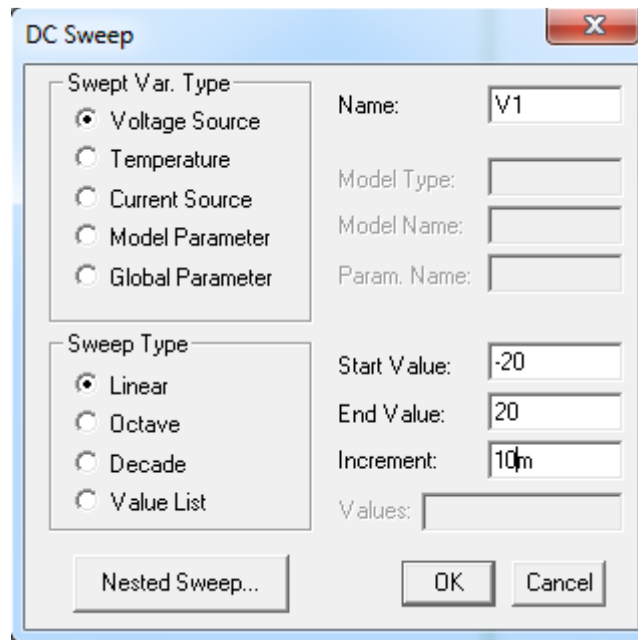
R_s คือ ค่าความต้านทาน มีค่าเท่ากับ 50Ω

n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อย มีค่าเท่ากับ 1.679

BV คือ ค่าแรงดันย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ 15V

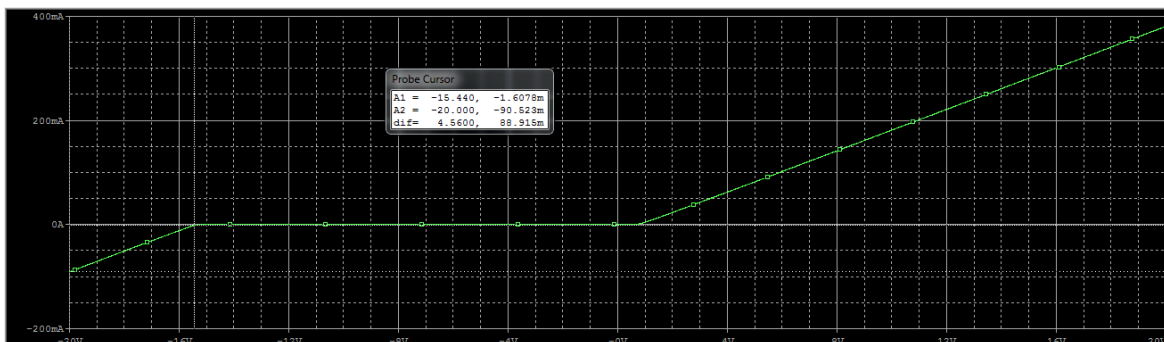
IBV คือ ค่ากระแสที่แรงดันย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ 1nA

5. เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ตามข้อ 4 เสร็จแล้ว ต่อไปให้เราทำการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ห้วงจรตามรูปที่ 2.29 โดยเลือกแบบ DC Sweep ซึ่งการเลือกในลักษณะนี้จะเป็นการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อที่จะดูกราฟคุณลักษณะไดโอดที่ได้สร้างโมเดลขึ้นมา



รูปที่ 2.29

6. เมื่อกำหนดค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ก็สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ห้วงจรได้ โดยจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 2.30 ซึ่งกราฟจะแสดงคุณลักษณะของไดโอดที่เราได้ทำการทดสอบ

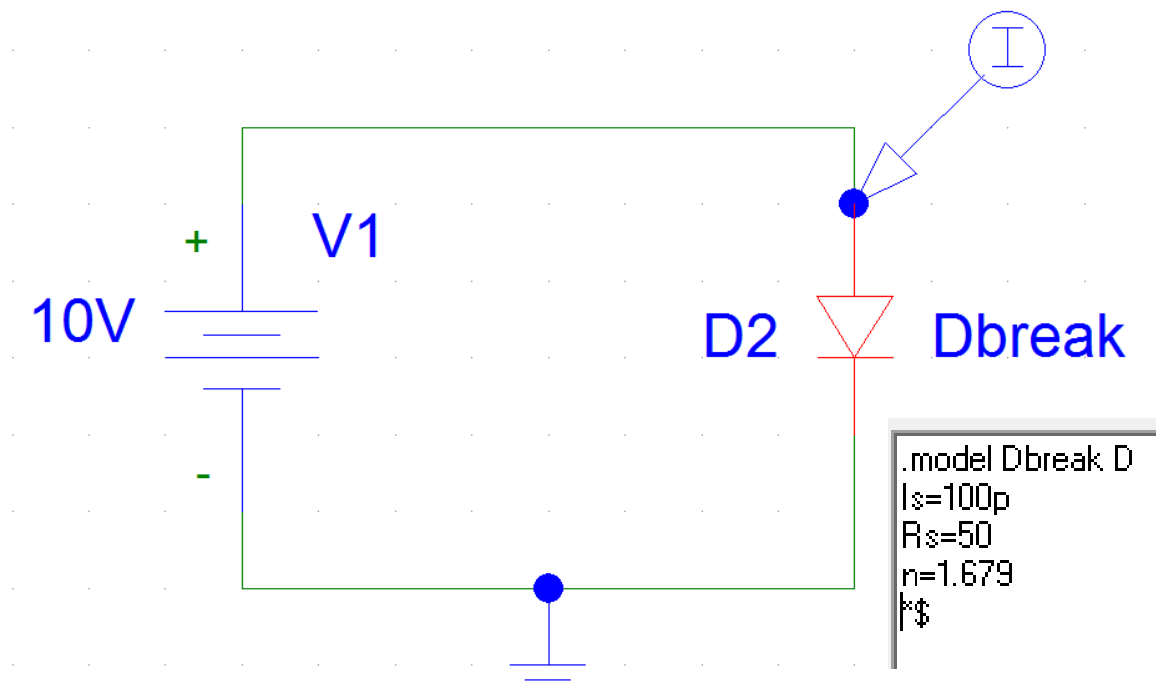


รูปที่ 2.30

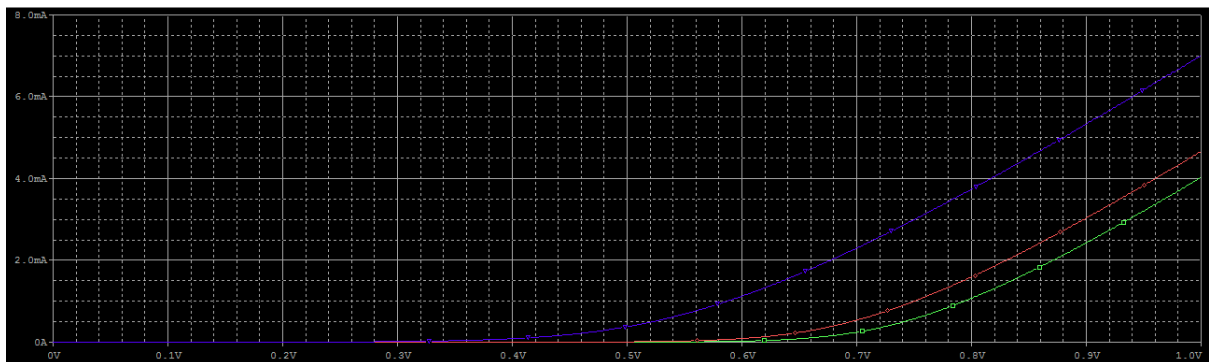
การทดลองที่ 2

ไดโอด (Diode)

การทดลอง จากรูปที่ 2.31 จงทำการพล็อตกราฟดูกระแสไฟฟ้าที่แรงดันจาก 0V ถึง 1V ที่อุณหภูมิของไดโอดที่ 0, 27 และ 125 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในตัวไดโอดเป็นไปดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31



รูปที่ 2.32