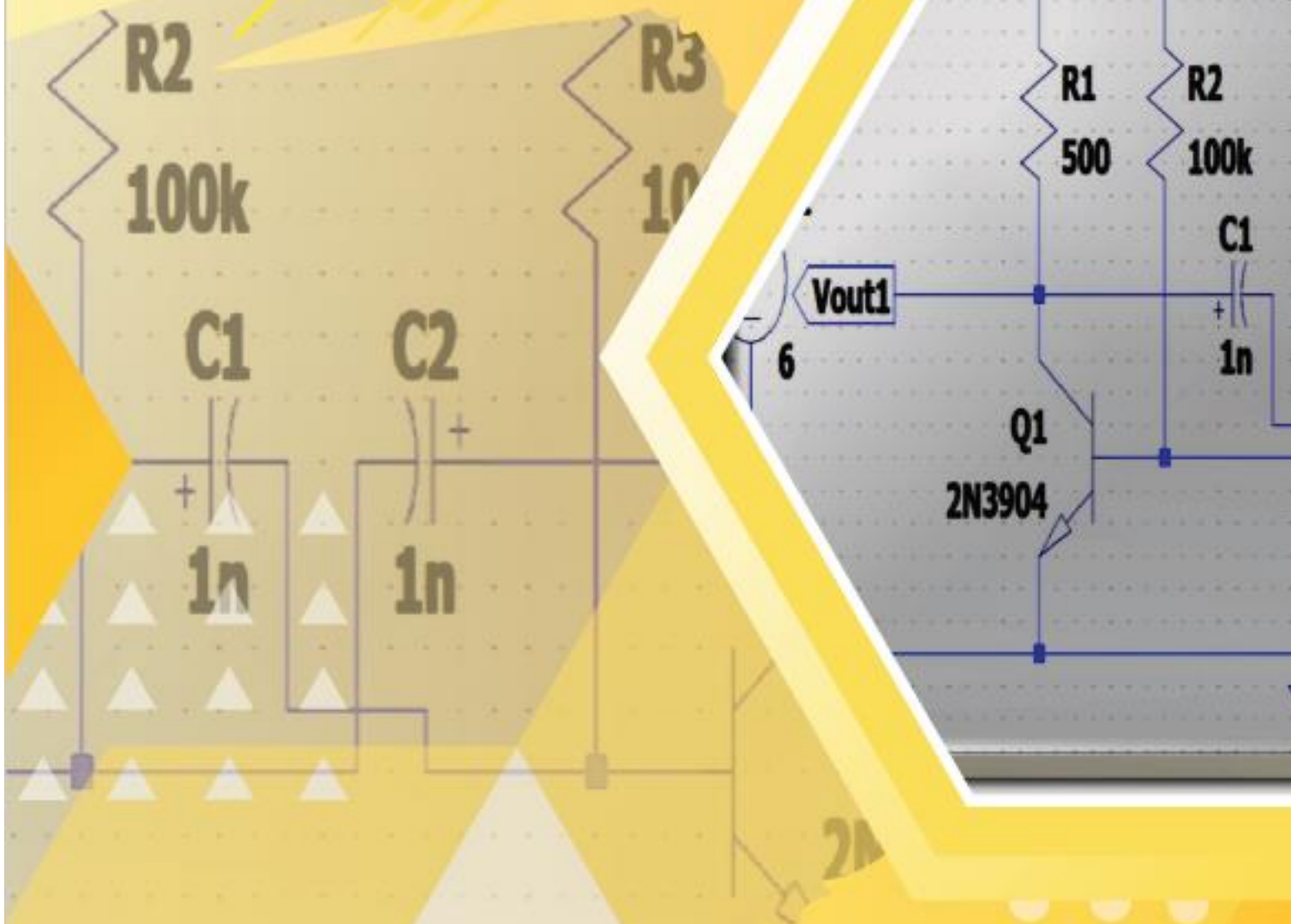


ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ด้วยโปรแกรมจำลอง LT SPICE



จันทร์ อัญญาโพธิ์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
2567

ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ด้วยโปรแกรมจำลอง **LTspice**

จันทร์ อัญญาโพธิ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

2567

ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมด้วยโปรแกรมจำลอง LTspice

ผศ.ดร.จันทร์ อัญญาโพธิ์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2567

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ 2537

ห้ามคัดลอกเนื้อหาก่อนได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

National Library of Thailand Cataloging in Publication data

จันทร์ อัญญาโพธิ์.

ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมด้วยโปรแกรมจำลอง LTspice.-- กรุงเทพฯ : [ม.ป.พ.],
2567.

217 หน้า.

1. การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์. 2. วงจรไฟฟ้า -- โปรแกรมคอมพิวเตอร์. 3. โปรแกรม
คอมพิวเตอร์. I. ชื่อเรื่อง.

005.3

ISBN 978-616-616-883-9

จัดพิมพ์โดย

ผศ.ดร.จันทร์ อัญญาโพธิ์ จัดพิมพ์แบบ E-Book

คำนำ

หนังสือเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเอกสารประกอบการสอนนักศึกษาในรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมของหลักสูตรระดับปริญญาตรี โปรแกรมจำลอง LTspice เป็นซอฟต์แวร์ช่วยในการวิเคราะห์และจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Linear Technology Corporation สามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้ฟรี สามารถเขียนวงจรลงในหน้าจอและสั่งให้โปรแกรมจำลองการทำงานออกมา ซึ่งช่วยให้การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความสะดวกสบายใช้เวลาทำงานไม่นาน สามารถวัดค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรในช่วงเวลาต่างๆ ได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรที่ออกแบบได้ทันทีโดยไม่ต้องลงมือประกอบวงจรจริง

ผู้แต่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้อ่านในการใช้โปรแกรมจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผู้เรียบเรียงเรียงขอกราบขอบพระคุณ คุณครู ท่านอาจารย์ทุกท่าน และ บิดา มารดา ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมทั้งญาติ มิตร สหายที่คอยเป็นกำลังใจในการทำงานสอน ขอขอบคุณนักศึกษาทุกรุ่นที่ร่วมช่วยให้ข้อชี้แนะในการปรับปรุงเนื้อหาและวิธีการสอน ขอขอบคุณผู้เขียนหนังสือ ตำรา บทความ และงานวิจัยที่ผู้เขียนนำมาใช้อ้างอิง ขอขอบคุณกำลังใจจากคุณภรรยา คุณณัฐสุดา คำเพราะ พร้อมทั้งช่วยออกแบบหน้าปก นื่องค์ได้เจตนิพัทธ์ อัญญาโพธิ์บุตรชายที่ช่วยมากวนตอนทำต้นฉบับ เนื่องจากการเรียบเรียงและจัดพิมพ์ครั้งแรก อาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น หากมีเนื้อหาที่ผิดพลาด คลาดเคลื่อนหรือขาดตกบกพร่องประการใดสามารถแจ้งมาที่จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ chan@pit.ac.th ผู้เรียบเรียงกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วยและจะนำข้อผิดพลาดนั้นไปปรับปรุงแก้ไขในการเรียบเรียงและจัดพิมพ์ในครั้งต่อไป

ผศ.ดร.จันทร อัญญาโพธิ์

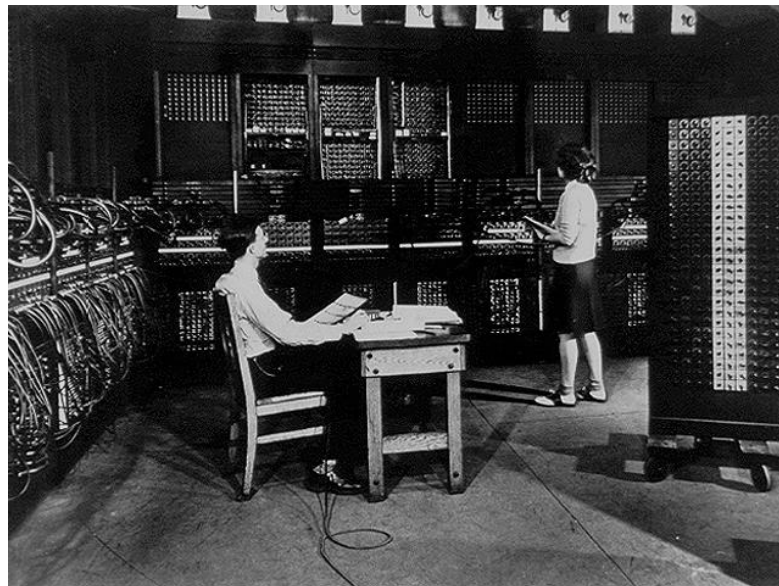
<https://electronicspit.tech/>

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
คำนำ	
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ไดโอด.....	20
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้งานไดโอด.....	39
บทที่ 4 ซีเนอร์ไดโอด.....	53
บทที่ 5 ทรานซิสเตอร์.....	66
บทที่ 6 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์.....	85
บทที่ 7 การใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์.....	126
บทที่ 8 ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า.....	143
บทที่ 9 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า.....	184

บทที่ 1 บทนำ

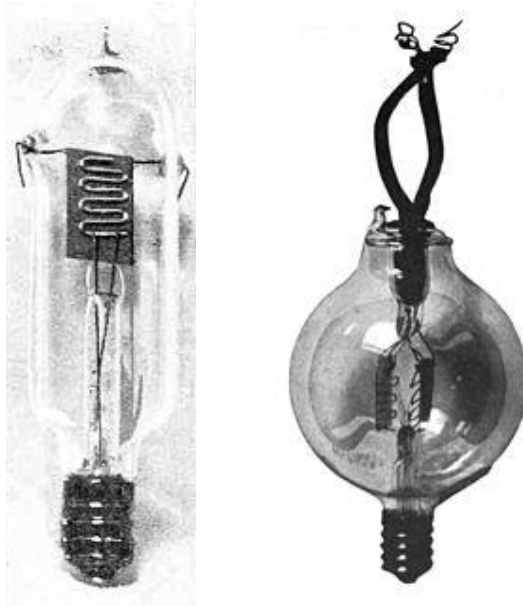
วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Engineering) เดิมเป็นสาขาหนึ่งของวิศวกรรมไฟฟ้าที่ถูกแยกออกมาเพื่อให้เห็นความแตกต่างของงานทางด้านไฟฟ้ากำลัง กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อิเล็กทรอนิกส์ดิจิทัล คอมพิวเตอร์เครื่องแรกทำด้วยหลอดสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปแล้วอิเล็กทรอนิกส์กรรมหมายรวมถึง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ระดับสัญญาณต่ำ (small signal) ทั้งระบบแอนะล็อกและดิจิทัล ทั้งระดับแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) และ วงจรรวม (Integrated Circuit) และอาจรวมถึงระบบสื่อสารทั้งทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการสื่อสารทางแสง เดิมทีเป็นสาขาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ และ ทดสอบวงจรไฟฟ้า ซึ่งสร้างจากอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่อุปกรณ์ที่เป็นแอคทีฟ เช่น หลอดสุญญากาศ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) จอแสดงผล รวมไปถึง อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และ อื่น ๆ รวมทั้งอุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานตามจุดประสงค์ที่ต้องการ เช่น เป็นวงจรเครื่องโทรศัพท์ วงจรรับฟังคลื่นวิทยุ วงจรเครื่องรับโทรทัศน์ วงจรเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ปัจจุบันขอบเขตของงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถูกขยายออกไปเป็นสาขาย่อย ได้แก่ อิเล็กทรอนิกส์แบบแอนะล็อก อิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล ระบบสมองกลฝังตัว และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยังเข้าไปมีส่วนในการทำงานร่วมกับระบบสื่อสารและโทรคมนาคม ระบบควบคุม(Control system) การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) วิศวกรรมระบบคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมเครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ วิศวกรรมพลังงาน และงานอื่นๆ อีกมากมาย



รูปที่ 1.1 อิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล คอมพิวเตอร์เครื่องแรกทำด้วยหลอดสุญญากาศ

ที่มา: https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:Eniac_Aberdeen.jpg

จุดเริ่มต้นของสาขาอิเล็กทรอนิกส์ได้ถือกำเนิดจากการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีโทรเลขในปลายศตวรรษที่ 19 และวิทยุและโทรศัพท์ในต้นศตวรรษที่ 20 การประดิษฐ์หลอดสุญญากาศ Audion ในปี ค.ศ. 1907 โดย Lee de Forest ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1.2 (ซ้าย) หลอดสุญญากาศ Audion ต้นแบบตัวแรกที่มีกริด(สายซิกแซก) ระหว่างฟิลาเมนต์และเพลท (ขวา) การพัฒนาหลอดสุญญากาศในภายหลัง กริดและจานแบ่งเป็นสองส่วนที่ด้านใดด้านหนึ่งของไส้หลอดกลาง ในหลอดทั้งสองนี้ไส้หลอดจะถูกเผาไหม้

ที่มา : <https://en.wikipedia.org/wiki/Audion>

ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสร้างวงจรรับส่งสัญญาณและอุปกรณ์จำนวนมากของการพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองของเรดาร์ โซนาร์ ระบบการสื่อสารและโทรคมนาคม และอาวุธที่ทันสมัย ในปลายปี 1950 ที่วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในระยะเริ่มต้นที่มีการคิดค้นและประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ตัวแรกของโลก โดย วิลเลียม ช็อคลีย์ (William Shockley) ที่ ศูนย์วิจัยเบลล์ (Bell Labs) ซึ่งเป็นวิวัฒนาการที่สำคัญ ทำให้สามารถสร้างวงจรต่าง ๆ ในขนาดเล็กลง และประหยัดไฟฟ้าในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากนั้นจะอยู่ในรูป ที่เรียกว่า วงจรรวม (integrated circuit) ซึ่งวงจรทั้งหมดนั้นจะถูกสร้างอยู่บนแผ่นสารกึ่งตัวนำ เรียก ชิพ (chip) ซึ่งบนแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณเท่าเหรียญนี้ จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์จำนวนมากนับล้าน ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นยังมีขนาดที่เล็กลง และ ประหยัดไฟมากขึ้น

การออกแบบวงจรรวมนี้ นอกจากการออกแบบตัววงจรแล้ว ยังรวมไปถึงการแปลงแผนภูมิวงจร (schematic) ให้อยู่ในรูปแผนภูมิเพื่อการสร้างบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ (layout) ซึ่งการแปลงนี้จะมีการใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วย กระบวนการในการผลิต วงจรรวมก็เป็นสาขาย่อยหนึ่งที่สำคัญในปัจจุบัน เนื่องมาจากเทคโนโลยีในการผลิตนี้ (ดู photolithography) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ในขนาดที่เล็กมากเป็น ไมโครเมตร หรือ นาโนเมตร นอกจากนี้เทคโนโลยีนี้ยังเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีร่วมระหว่างสาขาไฟฟ้าและ เครื่องกล คือ ไมโครเทคโนโลยี (MEMS) ซึ่งเป็นการออกแบบอุปกรณ์กลไกขนาดไมโครเมตร ในวงจรรวมวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีหลายสาขา ส่วนนี้จะอธิบายบางส่วน of สาขาที่นิยมมากที่สุด สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แม้ว่าจะมีวิศวกรที่มุ่งเน้นเฉพาะในสาขาใดสาขาหนึ่งโดยเฉพาะ ยังมีอีกหลายคนให้ความสำคัญกับการรวมกันของหลายสาขาการประมวลสัญญาณ ทำเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการจัดการของสัญญาณ สัญญาณสามารถเป็นได้ทั้งแบบแอนะล็อก (สัญญาณที่แตกต่างกันไปอย่างต่อเนื่องตามข้อมูล) หรือดิจิทัล (สัญญาณที่แตกต่างกันไปตามชุดของค่าที่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่ไมต่อเนื่อง) สำหรับสัญญาณแอนะล็อก Signal Processing อาจเกี่ยวข้องกับการใช้วงจรขยายและการกรองของสัญญาณเสียงหรือการ modulate/demodulate ของสัญญาณสำหรับการสื่อสารโทรคมนาคม สำหรับสัญญาณดิจิทัล, การประมวลผลสัญญาณอาจเกี่ยวข้องกับการบีบอัด, การตรวจสอบข้อผิดพลาดและแก้ไขข้อผิดพลาดของสัญญาณดิจิทัล

วิศวกรรมสื่อสารและโทรคมนาคม เกี่ยวกับการส่งผ่านข้อมูลไปในตัวกลางเช่นสายเคเบิลแกนร่วมกัน ใยแก้วนำแสงหรืออากาศการส่งสัญญาณผ่านอากาศต้องจัดการให้ข้อมูลเข้ารหัสในคลื่นพาหะเพื่อที่จะแทรกข้อมูลเข้าไปในความถี่ของคลื่นพาหะที่เหมาะสมสำหรับการส่ง เรียกว่าการ modulation ซึ่งวิธีที่ยอดนิยมของสัญญาณแอนะล็อกคือการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) และ การมอดูเลตเชิงความถี่ (Frequency Modulation) การที่จะเลือกว่าควรจะใช้แบบไหนมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพของระบบและปัจจัยทั้งสองนี้จะต้องพิจารณาโดยวิศวกรวิศวกรรมโทรคมนาคมซึ่งจะออกแบบเครื่องส่งสัญญาณและรับสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับระบบดังกล่าว อุปกรณ์การสื่อสารที่ทำได้ทั้งส่งและรับเรียกว่า transceiver ข้อพิจารณาที่สำคัญในการออกแบบเครื่องส่งสัญญาณคือการใช้พลังงานในการส่ง หากความแรงของสัญญาณจากเครื่องส่งสัญญาณไม่เพียงพอ ข้อมูลของสัญญาณจะสูญหายด้วยสัญญาณรบกวน

วิศวกรรมระบบควบคุม มีหลากหลายมากตั้งแต่การบินและระบบแรงขับของเครื่องบินเชิงพาณิชย์ ไปจนถึงการควบคุมการวิ่งของรถยนต์ที่ทันสมัยในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอัตโนมัติวิศวกรรมควบคุมมักจะใช้ประโยชน์จากการป้อนกลับ (Feedback) ในการออกแบบระบบควบคุม ยกตัวอย่างเช่นในรถที่มีการควบคุมการเร่งความเร็วของรถคือการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องและป้อนกลับไปยังระบบซึ่งปรับการส่งออกพลังงานของเครื่องยนต์ ในกรณีที่มีการป้อนกลับ (Feedback) อย่างสม่ำเสมอ ทฤษฎีการควบคุมสามารถใช้ในการกำหนดวิธีการที่การป้อนกลับ


วิศวกรรมเครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า เกี่ยวข้องกับการออกแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณทางกายภาพ เช่น ความดัน, การไหลและอุณหภูมิ อุปกรณ์เหล่านี้เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์กำลังเตรียมการทดลองด้วย Electronic Neutron Generator การออกแบบของเครื่องมือดังกล่าวจำเป็นต้องมีความเข้าใจที่ดีของฟิสิกส์ที่มักจะรวมไปถึงทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นปืนเรดาร์ใช้ Doppler Effect ในการวัดความเร็วของยานพาหนะที่กำลังวิ่งเข้ามา ในทำนองเดียวกันเทอร์โมคัพเพิลใช้ผล Peltier-Seebeck เพื่อวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุดเครื่องมืออาจไม่ได้ถูกใช้ด้วยตัวเอง แต่ใช้เป็นเซ็นเซอร์ของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่แทน ตัวอย่างเช่นเทอร์โมคัพเพิลอาจจะนำมาใช้เพื่อช่วยให้อุณหภูมิของเตาเผาที่เป็นต้น

เริ่มต้นเรียนรู้วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จากโปรแกรมจำลองการทำงาน

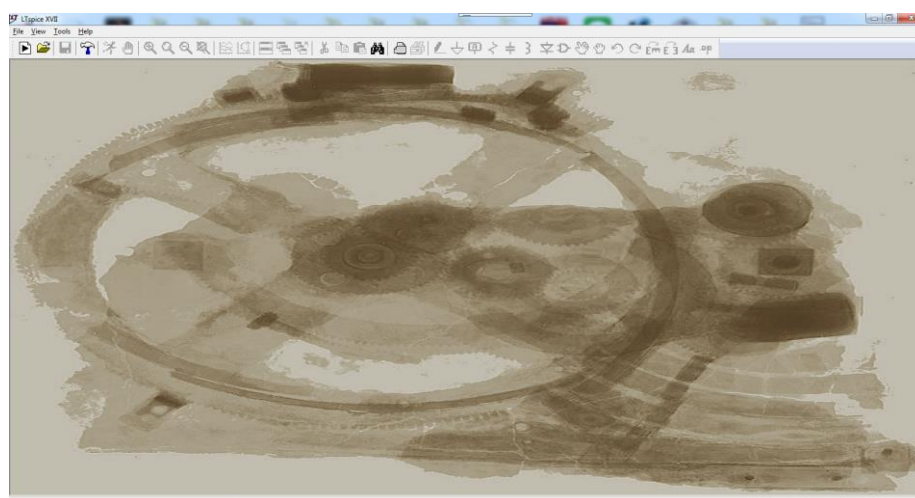
1. การใช้งานโปรแกรม LTspice (Linear Technology Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)

LTspice เป็นซอฟต์แวร์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบและจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Linear Technology Corporation สามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้ฟรี ที่สามารถเขียนวงจรลงในหน้าจอและสั่งให้โปรแกรมจำลองการทำงานออกมาซึ่งช่วยให้การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความสะดวกสบายใช้เวลาทำงานไม่นานก็สามารถวัดค่าแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรในช่วงเวลาต่างๆ ได้ ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรที่ออกแบบได้ทันทีโดยไม่ต้องลงมือประกอบวงจรจริงขึ้นมาสามารถดาวน์โหลดได้ที่ลิงก์ <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

1.1 เปิด LTspice

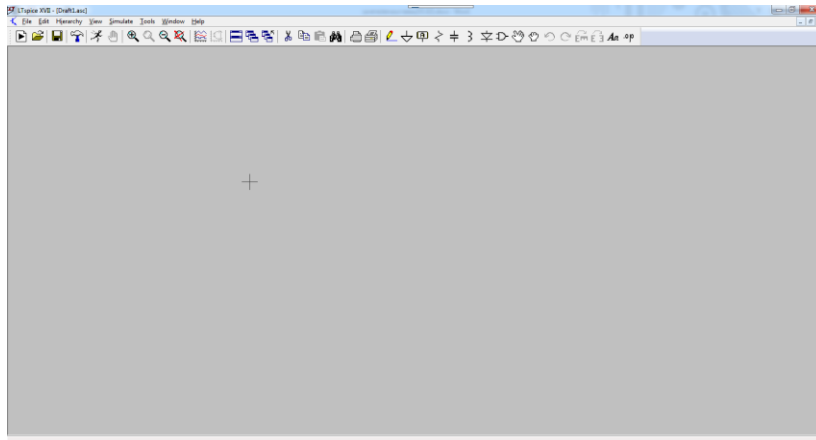
- ค้นหา LTspice บน C-Drive เปิด LTspice (หรือที่หน้าจอหาไอคอน ) หน้าจอเปิดจะมีลักษณะ

ดังนี้:



รูปที่ 1.3 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม LTspice

- เริ่มต้นสร้างวงจรใหม่ จาก Menu File หรือ คลิกที่ไอคอน 

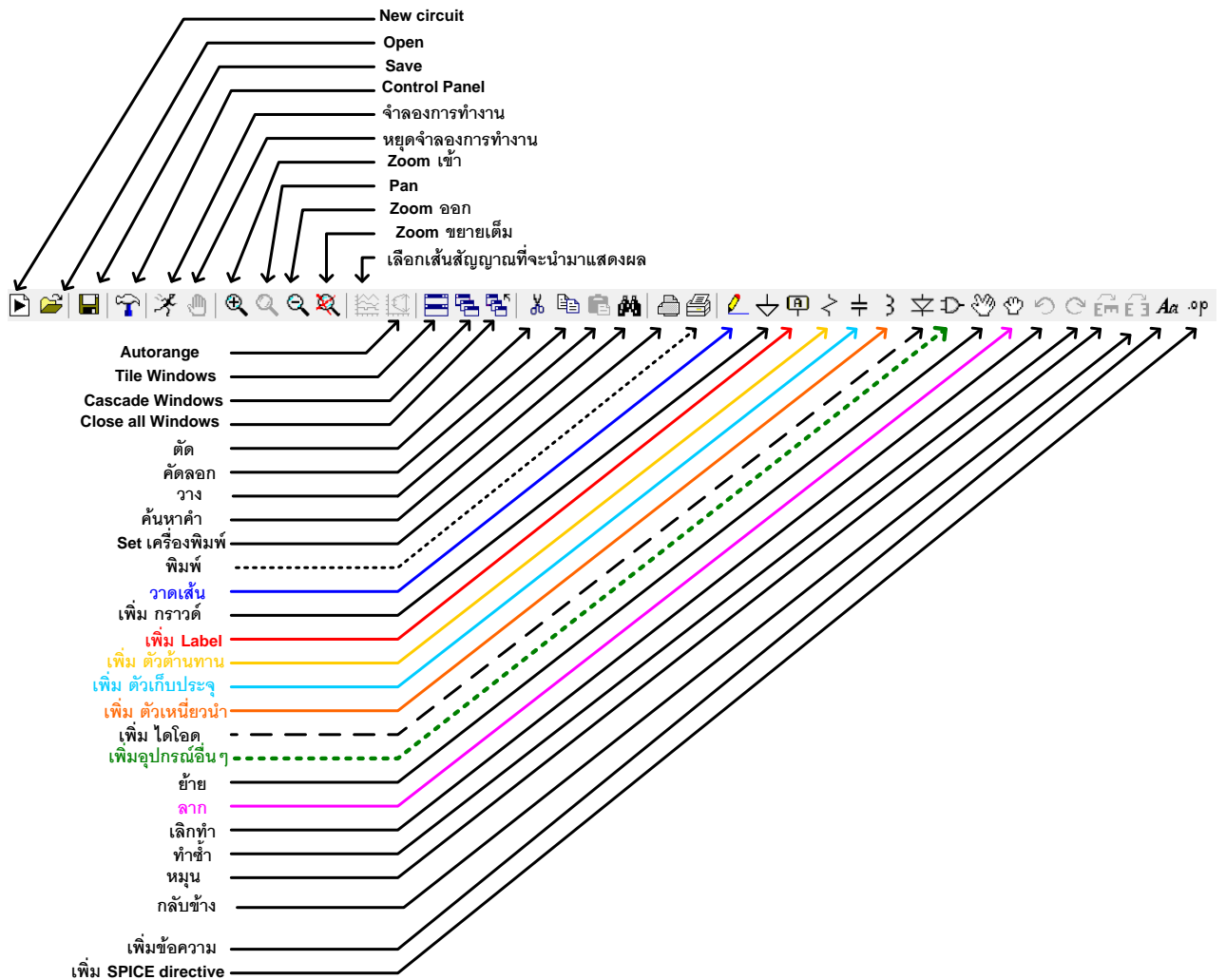


รูปที่ 1.4 หน้าต่างสำหรับการเริ่มการเขียนวงจรอิเล็กทรอนิกส์

คีย์ลัดต่างๆใน LTspice

- <F5> ลบ
- <F6> สำเนา
- <F7> ย้ายส่วนประกอบโดยไม่ต้องต่อสาย
- <F8> ย้ายส่วนประกอบด้วยสายไฟ
- <F9> เลิกทำ
- shift <F9> ทำซ้ำ
- <CTRL R> หมุนอุปกรณ์ (เมื่อเลือกแล้วให้ใช้ <F7>)
- <CTRL E > กลับด้านอุปกรณ์ (เมื่อเลือกแล้วให้ใช้ <F7>)


หน้าที่ของปุ่มต่างๆบน Toolbar



รูปที่ 1.5 หน้าที่ของปุ่มต่างๆบน Toolbar

1.2 การวาดวงจร

การเพิ่ม GND: สิ่งนี้สำคัญมาก ถ้าไม่มีเราจะไม่สามารถทำการจำลองใด ๆ บนวงจรได้หากไม่มีกราวด์ สามารถทำได้ดังนี้


กดปุ่ม “g” หรือใช้ไอคอนกราวด์  หรือ
ได้จากเมนู "Edit"

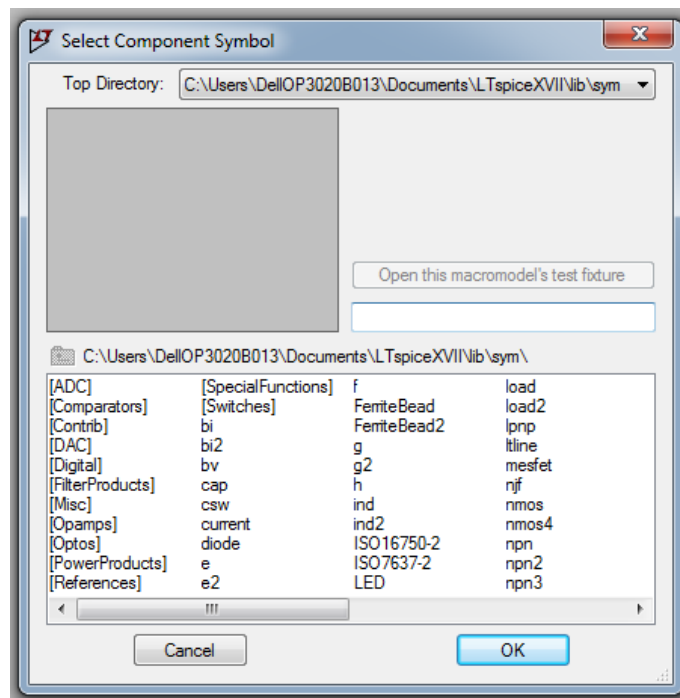
การเพิ่มอุปกรณ์อื่น ๆ

ต่อไปคือการหาชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์บางส่วนหรือทั้งหมดที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้โดย



(เหมาะสำหรับส่วนประกอบทั่วไปเช่นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำ ฯลฯ)

หรือสามารถคลิก  หรือ >> กด "F2"; หรือไปที่ "Edit" และเลือก "Component ..."



รูปที่ 1.6 หน้าต่างสำหรับการเลือกอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้งานบ่อยๆ ได้แก่

res - ตัวต้านทาน

cap - ตัวเก็บประจุ

ind - ตัวเหนี่ยวนำ

diode - ไดโอด

voltage - แหล่งจ่ายไฟหรือแบตเตอรี่ชนิดใดก็ได้

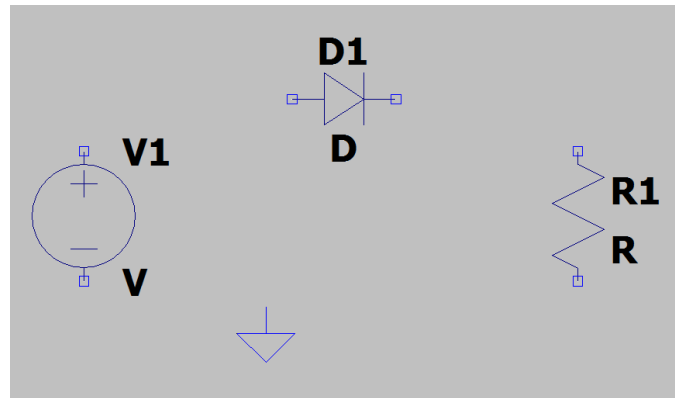
ในการหมุนชิ้นส่วนอุปกรณ์เพื่อให้พอดีกับวงจรให้กด "Ctrl + R" ก่อนวางชิ้นส่วน หากคุณต้องการสะท้อน (หรือ "Mirror") ส่วนนั้นให้กด "Ctrl + E"

เมื่อเลือกชิ้นส่วนแล้วให้คลิกตำแหน่งที่ต้องการวางไว้ (อยู่ที่ไหนสักแห่งบนหน้าสีเทาที่มีจุด) ไม่ต้องกังวลว่าจะวางในตำแหน่งที่ถูกต้องตรงนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ในภายหลัง

อุปกรณ์แต่ละประเภทสามารถวางได้หลายครั้งติดต่อกันและจะถูกกำหนดหมายเลขโดยอัตโนมัติ เมื่อต้องการหยุดวางอุปกรณ์บางประเภทให้คลิกขวาหรือกด "Esc"

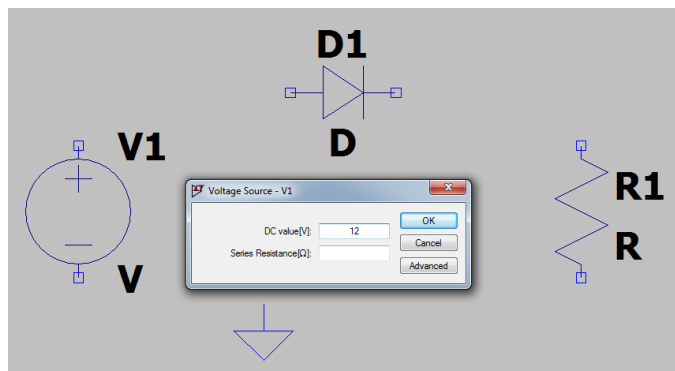
การวางชิ้นส่วน

เริ่มทำการชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 1.7 การนำอุปกรณ์มาวาง


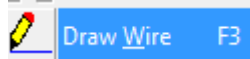
และสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับอุปกรณ์โดยการ ซี่เมาท์ไปที่อุปกรณ์และคลิกขวาเพื่อเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มค่าต่างๆให้กับอุปกรณ์ได้



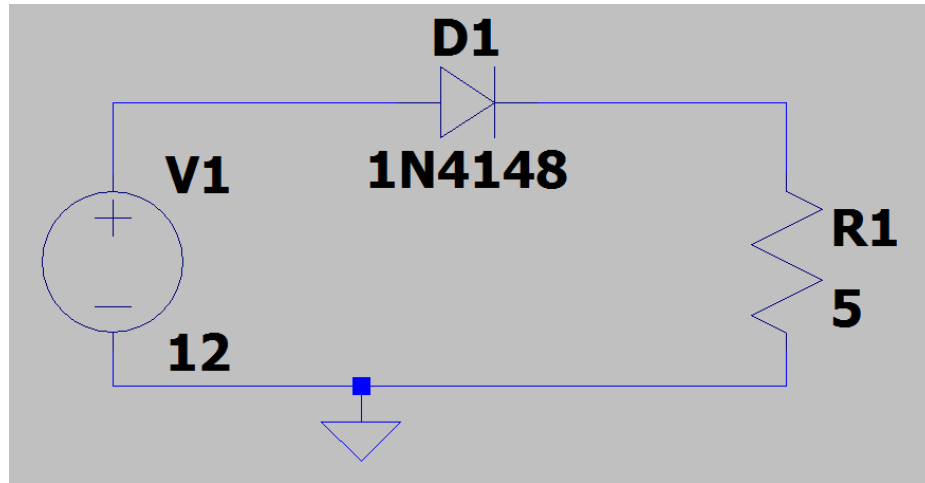
รูปที่ 1.8 การกำหนดค่าให้กับอุปกรณ์

การเชื่อมต่อวงจร

เมื่อทำการจัดเรียงชิ้นส่วนและอุปกรณ์ได้ดีแล้วจะต้องเชื่อมต่อด้วยสายไฟ โดยไปที่แถบเครื่องมือและ

เลือกไอคอน  หรือ "F3" หรือไปที่เมนู "Edit" และเลือก  Draw Wire F3

ตัวชี้รูปดินสอให้คลิกที่ปลายด้านหนึ่งของส่วนหนึ่งเมื่อเลื่อนเมาส์ไปรอบ ๆ จะเห็นเส้นกากบาทปรากฏขึ้น ต่อปลายสายอีกด้านเข้ากับส่วนถัดไปในวงจรทำซ้ำจนกว่าวงจรของจะถูกต่อสายอย่างสมบูรณ์




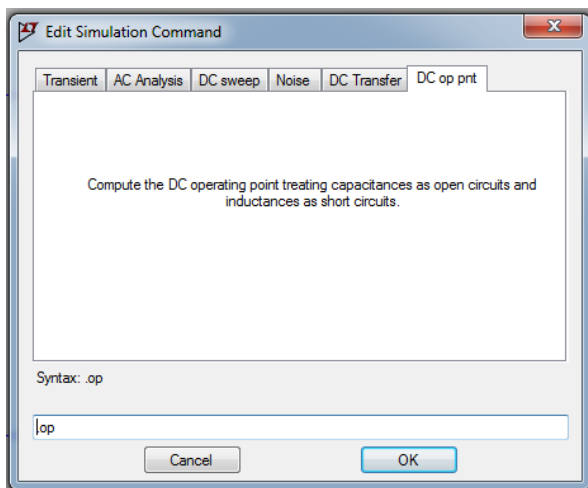
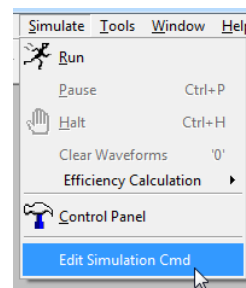
รูปที่ 1.9 การต่อวงจร

หากต้องการสร้างโหนดเพื่อให้สายไปได้มากกว่าที่เดียวให้คลิกที่ใดก็ได้บนเส้นสายจากนั้นคลิกไปที่ส่วนหรืออีกเส้นหนึ่งหรือสามารถเปลี่ยนจากส่วนหนึ่งไปยังสาย ควรเห็นบล็อกสี่เหลี่ยมเมื่อมีสายไฟ 3 สายขึ้นไปเชื่อมต่อที่จุด

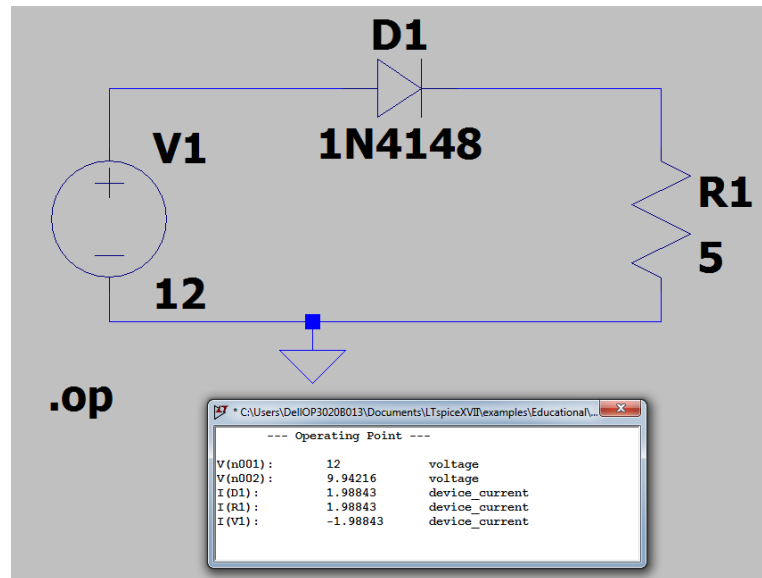
กด CTRL ค้างไว้ในขณะที่ลากเส้นช่วยให้ทำการเชื่อมต่อในแนวทแยงในตัวแก้ไขและในการกำจัดดินสอให้คลิกขวา การวางเมาส์เหนือส่วนประกอบทำให้คุณสามารถแก้ไขคุณสมบัติได้ สังเกตแถบสถานะที่ด้านล่างซ้าย

Simulation Commands

- DC Operating Point ไปที่ไอคอน  หรือไปที่เมนู

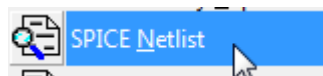


เป็นการวิเคราะห์ที่เรียบง่าย แต่มีประโยชน์อย่างมาก ถึงแม้จะไม่ได้แสดงกราฟพล็อตกราฟหรือสัญญาณใดๆ แต่จะระบุแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ไหลตรงทั้งหมดและกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ทั้งหมดในวงจรดังแสดงในรูปแบบ



รูปที่ 1.10 การดูผลการจำลอง

เราสามารถดู Spice netlist ได้จากเมนู View >>



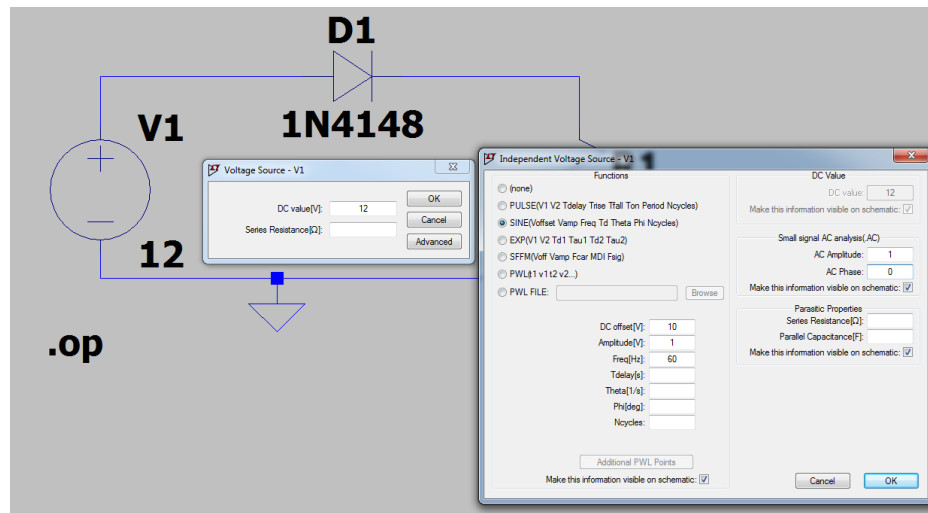
```

SPICE Netlist: C:\Users\DelloP3020B013\Documents\LTspiceXVII\examples\Educational\Draft1.net
* C:\Users\DelloP3020B013\Documents\LTspiceXVII\examples\Educational\Draft1.asc
V1 N001 0 12
D1 N001 N002 1N4148
R1 N002 0 5 tol=5 pwr=1
.model D D
.lib C:\Users\DelloP3020B013\Documents\LTspiceXVII\lib\cmp\standard.dio
.op
.backanno
.end

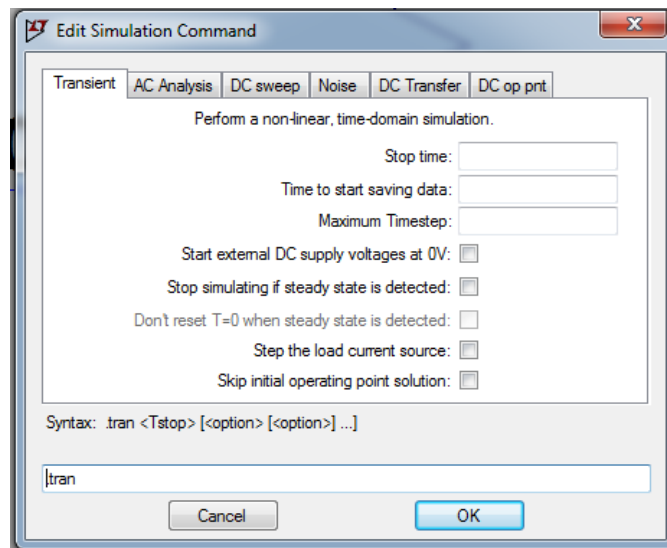
```

การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว Transient

เมื่อทำการวิเคราะห์แหล่งข้อมูลชั่วคราวส่วนที่ไฮไลต์ด้านล่างในหน้าต่างการกำหนดค่าแหล่งที่มาที่เกี่ยวข้อง หน้าต่างการกำหนดค่าแหล่งที่มา นี้คือหน้าต่างคำสั่งจำลอง:



เมนูคำสั่งจำลอง



การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว Transient อาจเป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญที่สุดที่คุณสามารถเรียกใช้ใน LTspice และจะคำนวณค่าต่างๆของวงจรของคุณเมื่อเวลาผ่านไป สองพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการวิเคราะห์ชั่วคราวคือ:

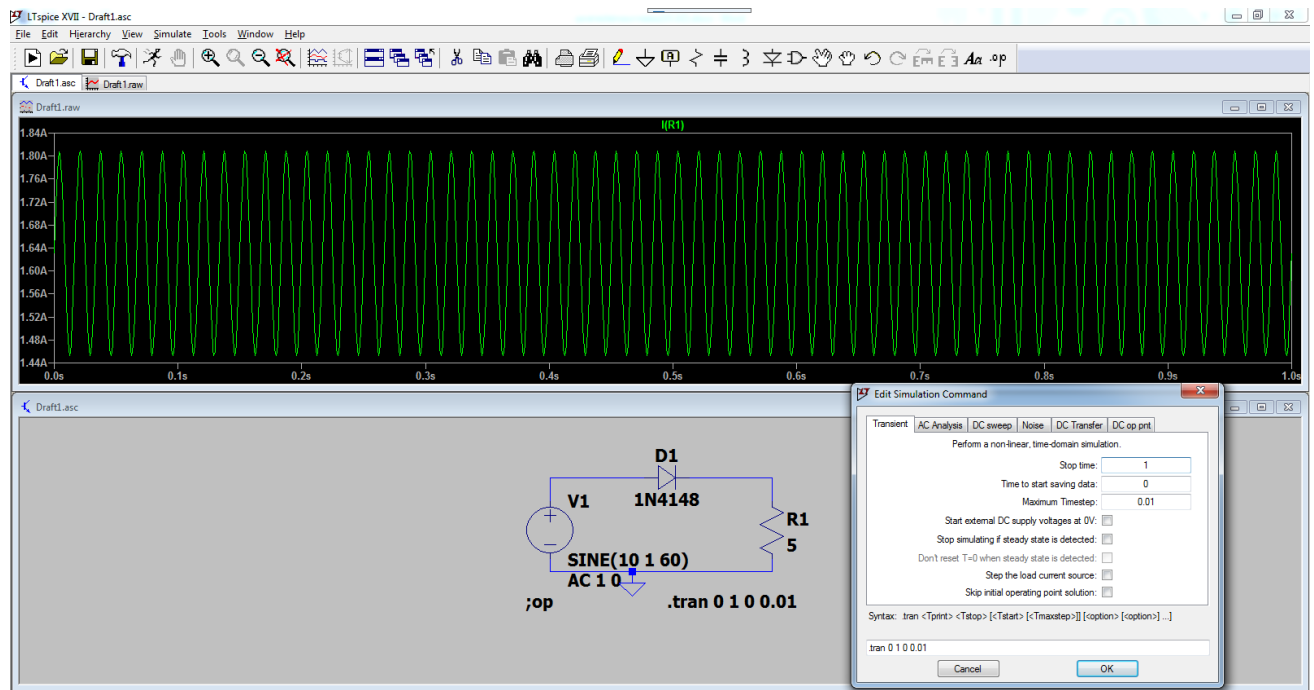
Stop time : เวลาหยุด

Time to start saving data: ถึงเวลาเริ่มบันทึกข้อมูล

Maximum Timestep : ระยะเวลาสูงสุด

(ช่องทำเครื่องหมายต่างๆ ในภายหลัง)

อัตราส่วนของเวลาหยุด: ระยะเวลาสูงสุดเป็นตัวกำหนดจำนวนการคำนวณที่โปรแกรม ต้องทำเพื่อพล็อตรูปคลื่นซึ่งโปรแกรม LTspice จะกำหนดเวลาเริ่มต้นเป็นศูนย์วินาทีและจะทำงานกว่าจะถึงเวลาสุดท้ายที่ผู้ใช้กำหนด เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงเวลาที่ควรใช้ก่อนที่จะเรียกใช้การจำลองหากกำหนดเวลาให้น้อยเกินไปหน้าจอโปรแกรมจะเต็มไปด้วยจุดที่ไม่จำเป็นทำให้อ่านยากและทำให้โปรแกรมเสียเวลาคำนวณมาก



รูปที่ 1.11 การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว Transient

เอกสารอ้างอิง

1. <https://th.wikipedia.org/wiki/วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์>
2. http://www.simonbramble.co.uk/lt_spice/ltspice_lt_spice.htm
3. <http://denethor.wlu.ca/ltspice/#bias>
4. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

ใบงานที่ 1. การใช้งานโปรแกรมจำลองทางอิเล็กทรอนิกส์

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII

การทดลองที่ 1 การติดตั้งโปรแกรม LTspice ในคอมพิวเตอร์

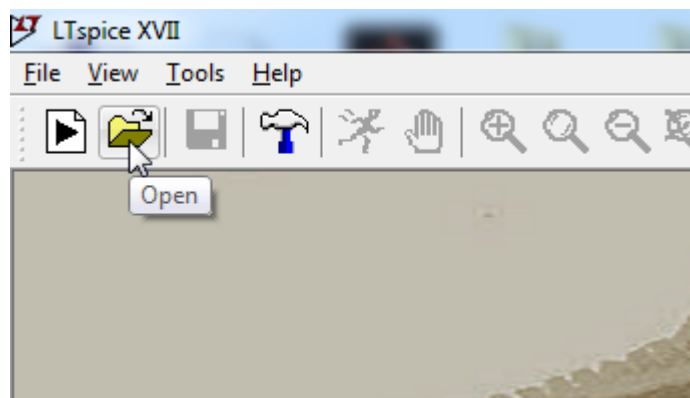
วิธีการทดลอง

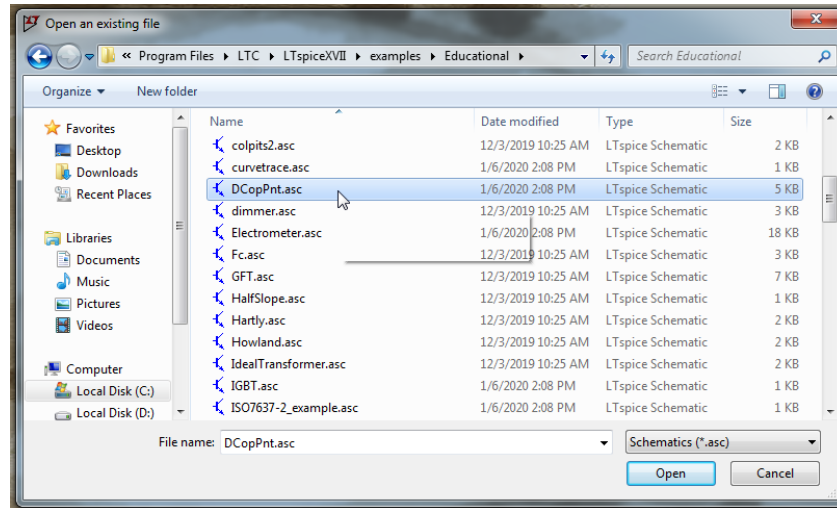
- 1.1 ดาวน์โหลดโปรแกรมจาก Web link : <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>
 - 1.2 ทำการติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- สรุปผลการทดลอง
-
-
-

การทดลองที่ 2 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม LTspice เบื้องต้น

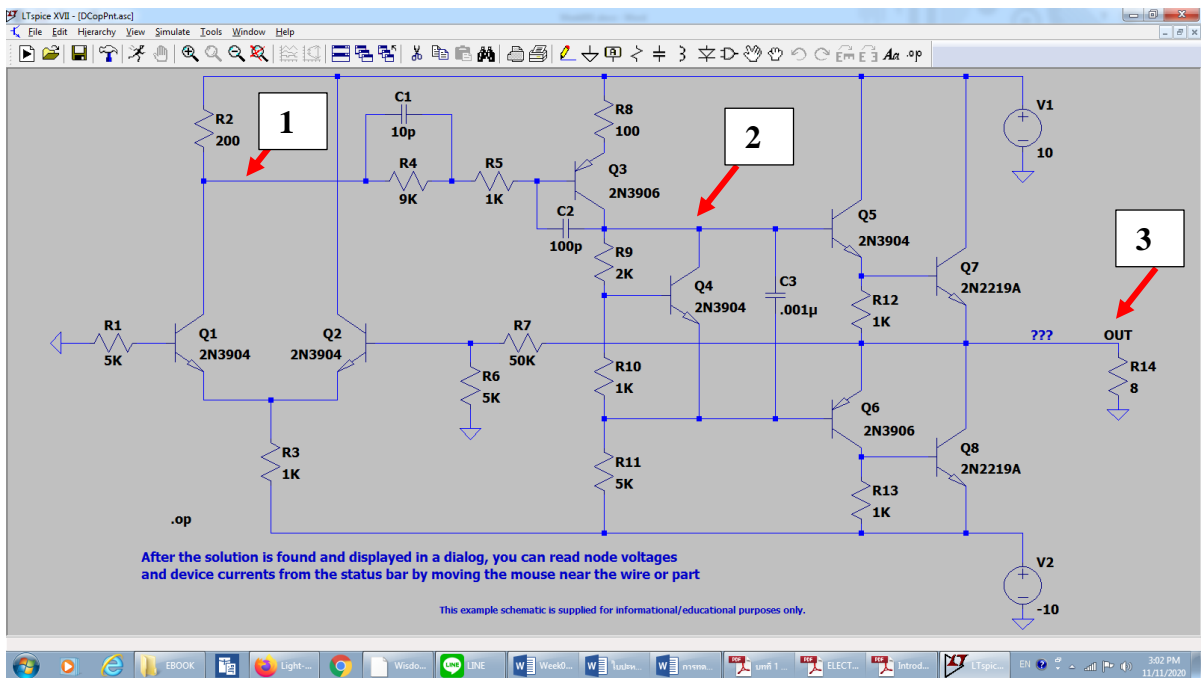
วิธีการทดลอง

- 2.1 ดับเบิลคลิก  LTspice XVII
- 2.2 ทดลองเปิดตัวอย่างวงจรที่มีใน LTspice example



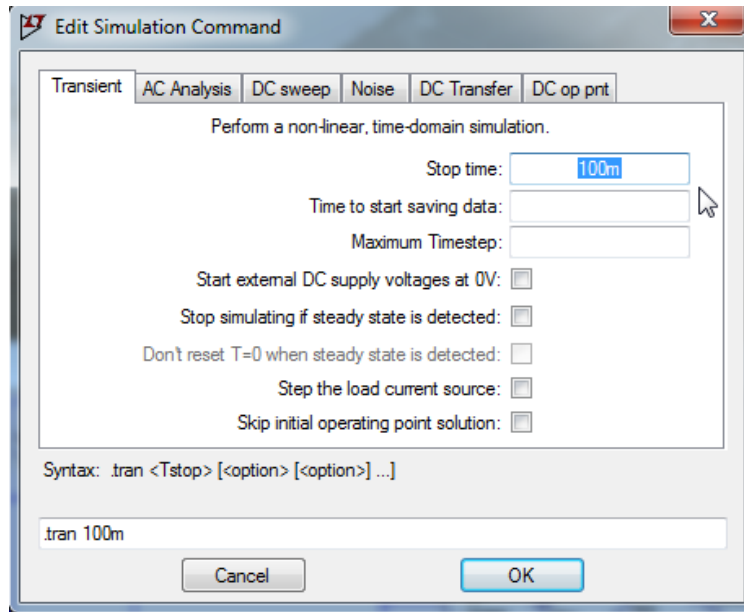


2.3 เมื่อทดลองเปิดตัวอย่างวงจรมานี้แล้วให้ทดลองวัดค่า DC ตามจุดต่างๆดังนี้



- แรงดัน DC จุดที่ 1 = V
- แรงดัน DC จุดที่ 2 = V
- แรงดัน DC จุดที่ 3 = V
- กระแส DC ที่ไหลผ่าน R1 = A
- กระแส DC ที่ไหลผ่าน R2 = A
- กระแส DC ที่ไหลผ่าน R11 = A

2.4 จากหัวข้อ 2.3 จงวัดสัญญาณ ณ จุดต่างๆตามลูกศรชี้โดยการตั้งค่าการวัดเป็นแบบ Transient ให้แรงดัน ณ จุดที่โจทย์กำหนดมาในหัวข้อ 2.3 แสดงสัญญาณดังในภาพ พร้อมทั้งใช้ Curser ในการหาค่า DC จากสัญญาณในกราฟ

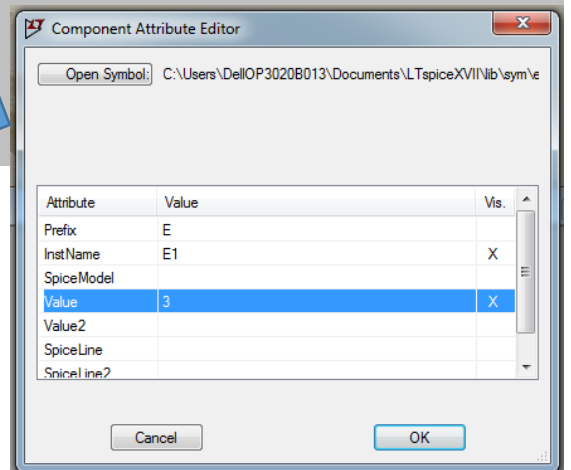
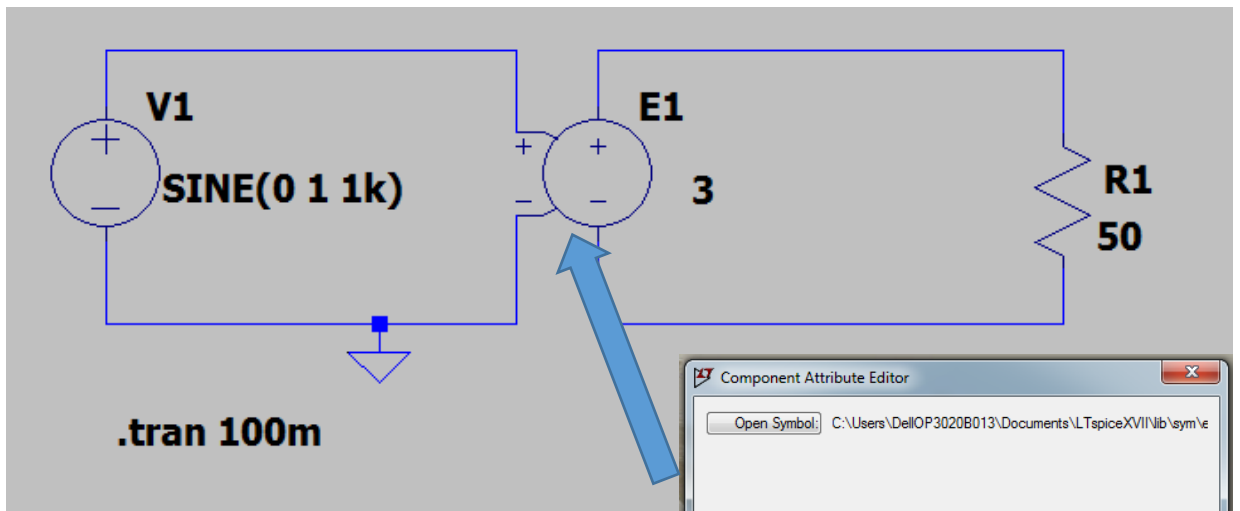
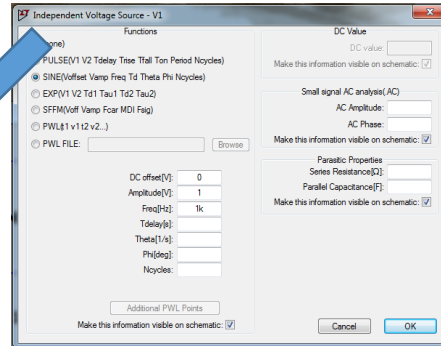


การทดลองที่ 3 การทดลองต่อวงจรและจำลองการทำงานเบื้องต้น

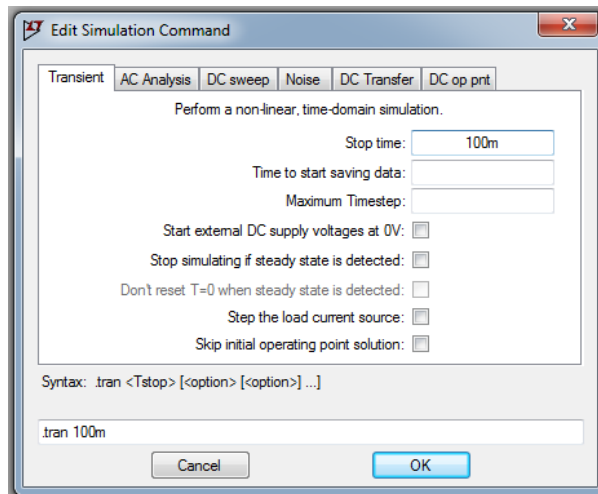
วิธีการทดลอง

3.1 ต่อวงจรตามภาพที่กำหนดให้ และกำหนดค่าให้กับ

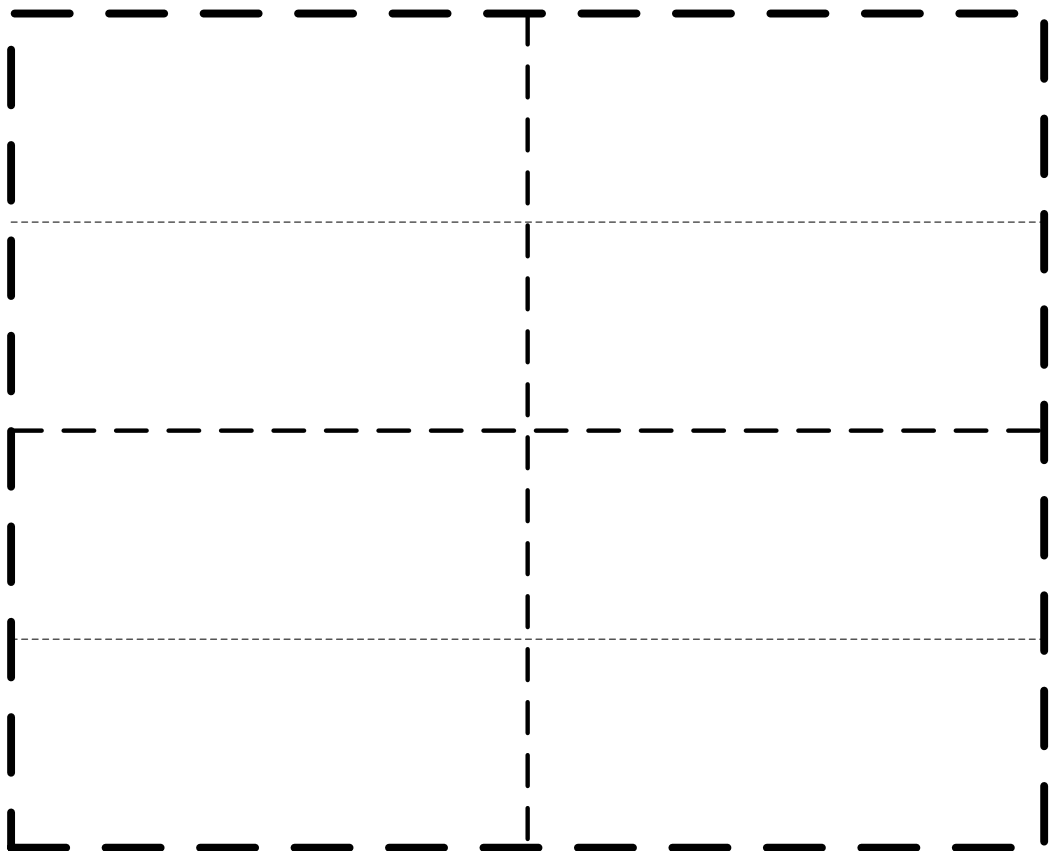
อุปกรณ์แต่ละตัว



3.2 ทำการจำลองการทำงานด้วย Mode Transient โดยกำหนดค่าตั้งภาพที่กำหนดให้

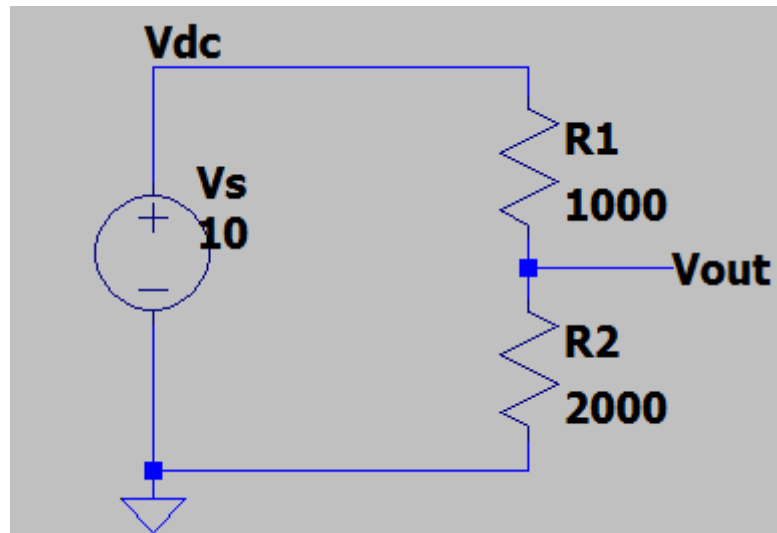


3.4 ทำการพลอตกราฟสัญญาณแรงดัน V1 และสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม R1

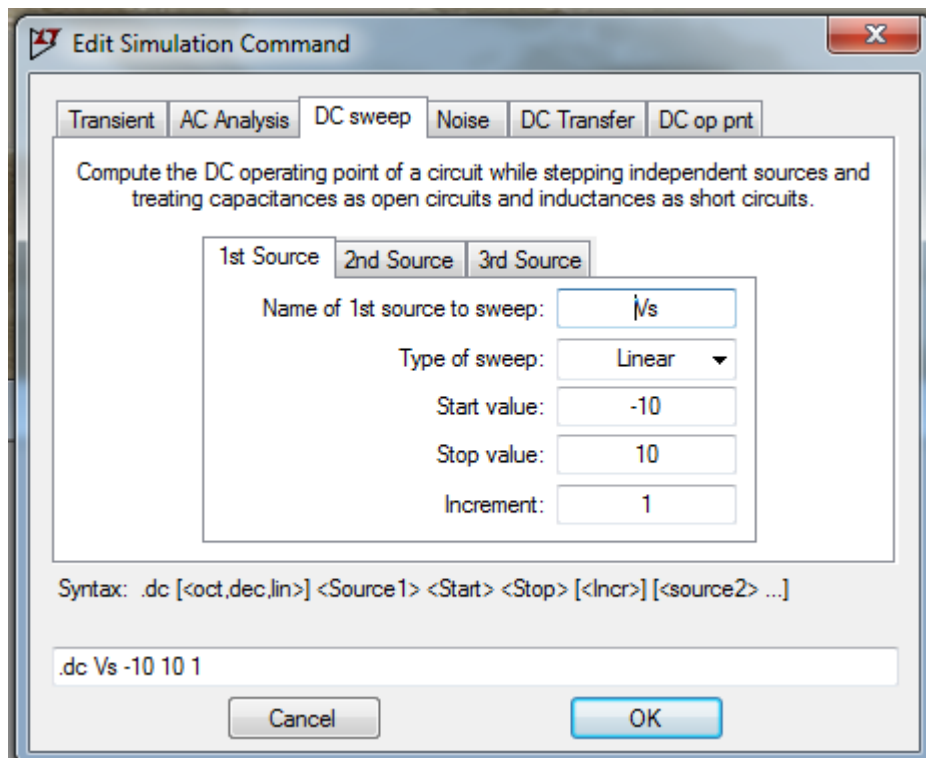


การทดลองที่ 4 การทดลองใช้งาน DC sweep

วิธีการทดลอง

4.1 ต้องจรรยาตามรูปที่กำหนดให้ ใช้ $V_s = 10 \text{ V (DC)}$, $R_1 = 1000$, $R_2=2000$ 

4.2 ตั้งค่า DC Sweep ใน Menu Edit Simulation Command ดังต่อไปนี้

จากนั้นให้ทำการพล็อตกราฟ V_{dc} และ V_{out}

4.3 จงตอบคำถามดังต่อไปนี้

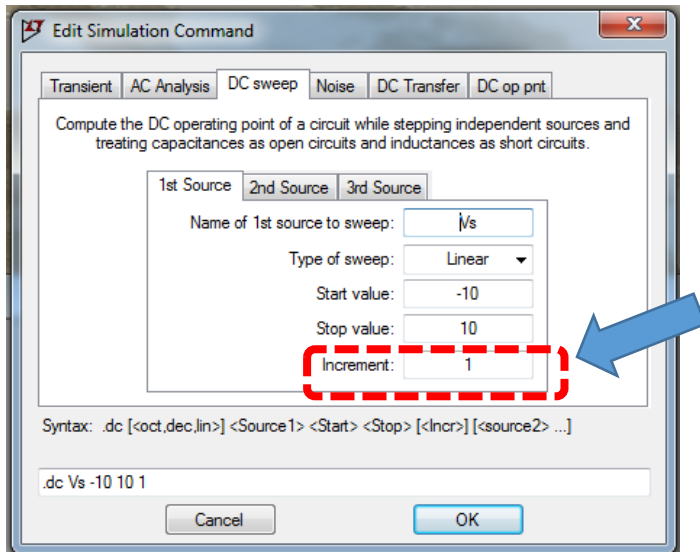
4.3.1 จงอธิบายการทำงานในภาพรวมของ DC sweep โดยสังเกตจากผลการทดลอง

.....

.....

.....

4.3.2 ถ้าเราเปลี่ยนค่า Increment value จาก 1 เป็น 0.5 จะเกิดอะไรขึ้น



.....

.....

.....

สรุปความรู้ที่ได้จากการทดลอง

.....

.....

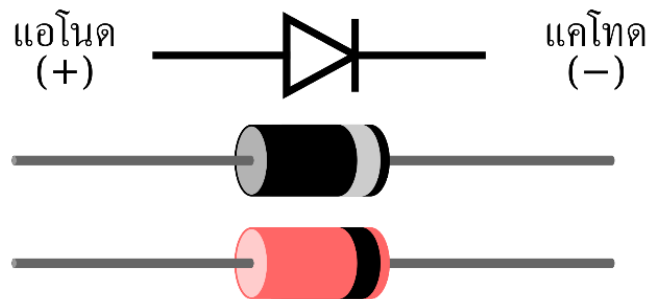
.....

.....

.....

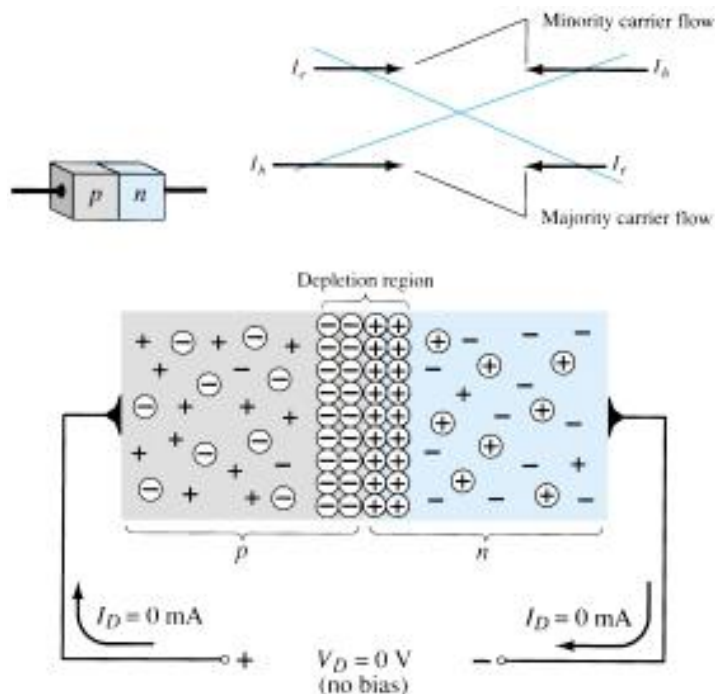
บทที่ 2 ไดโอด

ไดโอด(DIODE) เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ p-n สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode ; A) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ แคโทด (Cathode ; K) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด n ดังรูป



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ไดโอด

ที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/Diode>

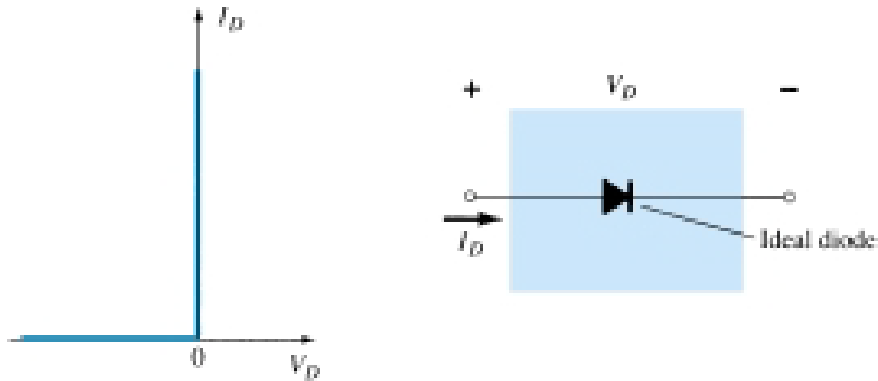


รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในรอยต่อ PN ของไดโอด

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

ไดโอดในทางอุดมคติ (Ideal Diode)

ไดโอดในอุดมคติมีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่สามารถนำกระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว



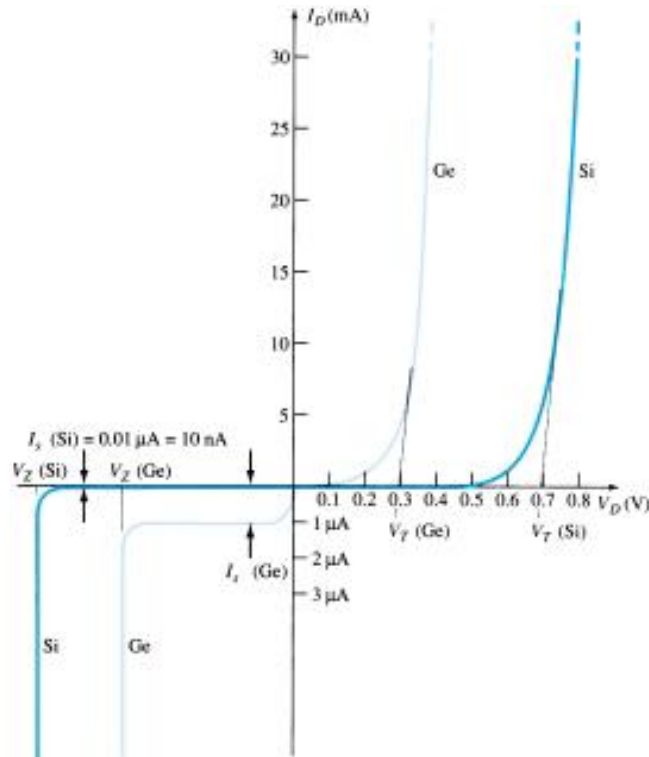
รูปที่ 2.3 ไดโอดในอุดมคติ

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

จากภาพถ้าต่อขั้วแบตเตอรี่ให้เป็นแบบไบอัสตรงไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนกับสวิตช์ที่ปิด (Close Switch) หรือไดโอดลัดวงจร (Short Circuit) I_D ไหลผ่านไดโอดได้ แต่ถ้าต่อขั้วแบตเตอรี่แบบไบอัสกลับ ไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนสวิตช์เปิด (Open Switch) หรือเปิดวงจร (Open Circuit) ทำให้ I_D เท่ากับ ศูนย์

ไดโอดในทางปฏิบัติ (Practical Diode)

ไดโอดในทางปฏิบัติมีการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อยที่บริเวณรอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้น ถ้าต่อไบอัสตรงให้กับไดโอดในทางปฏิบัติก็จะเกิด แรงดันเสมือน ($Ge \geq 0.3V$; $Si \geq 0.7V$) ซึ่งต้านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อการไบอัสตรง ดังรูป

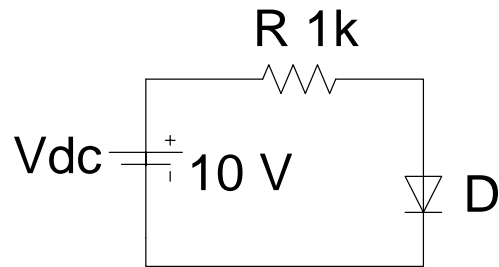


รูปที่ 2.4 เส้นกราฟคุณลักษณะของไดโอดในทางปฏิบัติ
ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

ขนาดของแรงดันเสมือนจึงเป็นตัวบอกจุดทำงาน ดังนั้น จึงเรียก **แรงดันเสมือน** อีกอย่างหนึ่งว่า **แรงดันในการเปิด** (Turn-on Voltage ; V_t) กรณีไบอัสกลับ เราทราบว่า Depletion Region จะขยายกว้างขึ้น แต่ก็ยังมีพาหะข้างน้อยแพร่กระจายที่รอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง แต่ก็ยังมีกระแสรั่วไหลอยู่จำนวนหนึ่ง เรียกว่า **กระแสรั่วไหล** (Leakage Current) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไดโอดนำกระแสเพิ่มขึ้นมาก ระดับกระแสที่จุดนี้ เรียกว่า **กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ** (Reverse Saturation Current ; I_s) แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า **แรงดันพังทลาย** (Breakdown Voltage) และถ้าแรงดันไบอัสสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ไดโอดทนได้ เราเรียกว่า **แรงดันพังทลายซีเนอร์** (Zener Breakdown Voltage ; V_z) ถ้าแรงดันไบอัสกลับสูงกว่า V_z จะเกิดความร้อนอย่างมากที่รอยต่อของไดโอด ส่งผลให้ไดโอดเสียหายหรือพังได้ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้เราเรียกว่า **แรงดันพังทลายอวาแลนซ์** (Avalanche Breakdown Voltage) ดังนั้น การนำไดโอดไปใช้งานจึงใช้กับการไบอัสตรงเท่านั้น

การคำนวณกระแสที่ไหลผ่านไดโอดในกรณีไบอัสตรง

ตัวอย่างที่ 2.1 กระแส I_D ที่ไหลผ่าน R มีค่าเท่าไร กำหนดให้ไดโอดที่ใช้เป็นแบบ Silicon มีค่าแรงดัน $V_D = 0.7V$



รูปที่ 2.5 การต่อไดโอดแบบไบอัสตรง

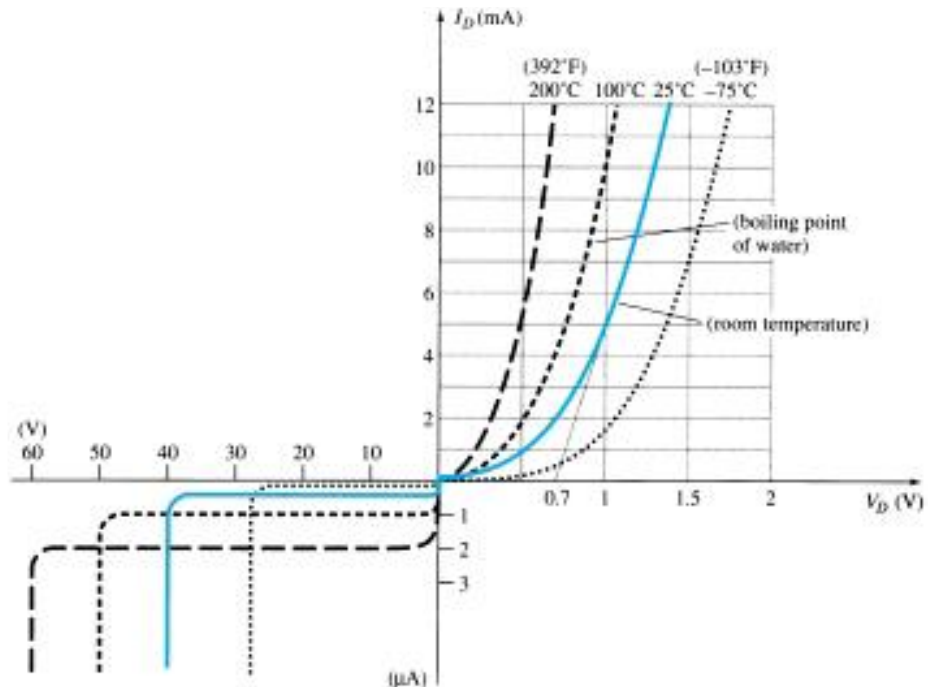
$$I_D = \frac{V_{dc} - V_D}{R} \quad (2.1)$$

$$I_D = \frac{10 - 0.7}{1000}$$

$$I_D = 9.3mA$$

ผลกระทบของอุณหภูมิ (Temperature Effects)

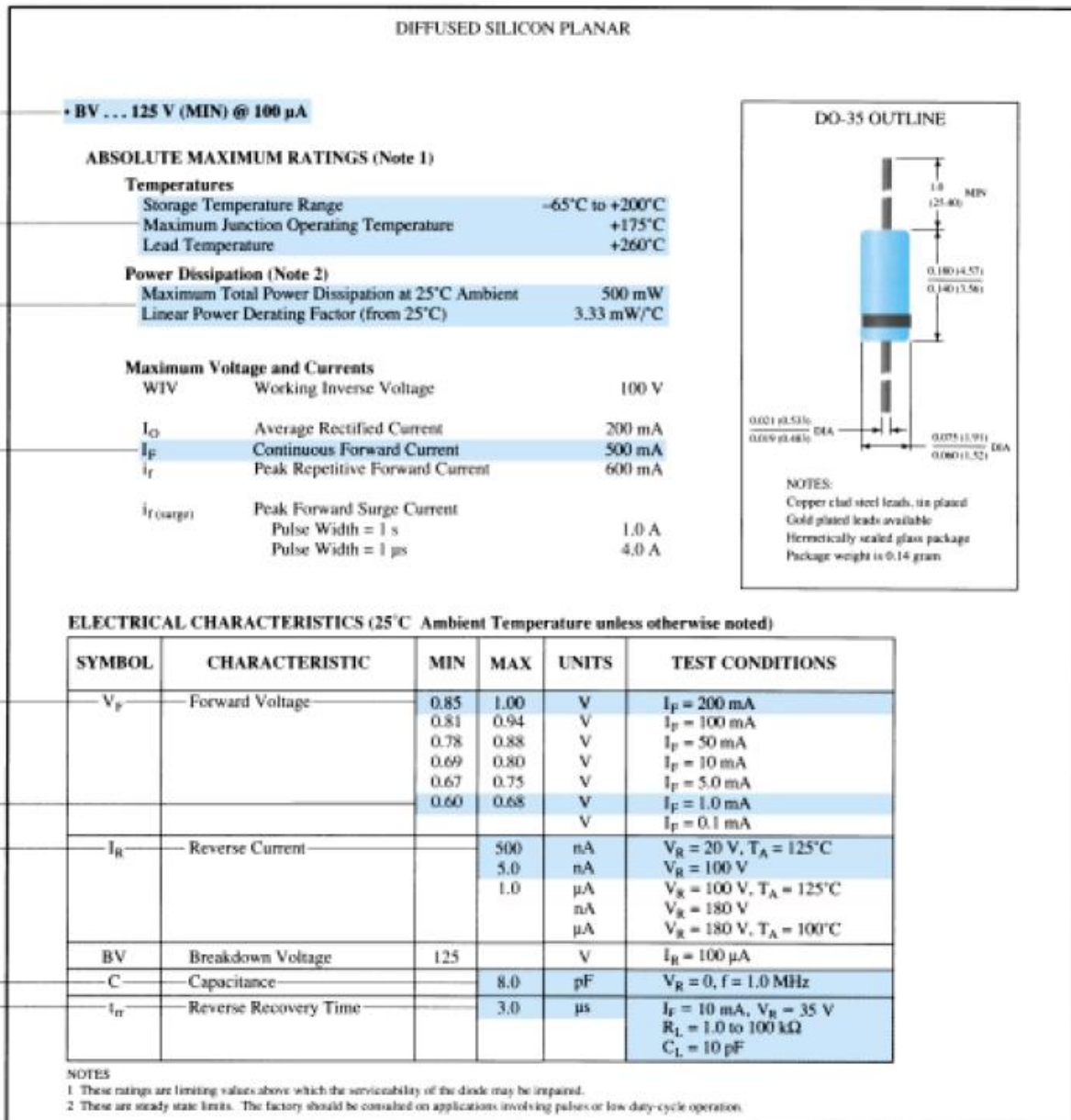
จากการทดลองพบว่า I_s ของ Si จะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า ทุกๆ ครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ขณะที่ Ge มีค่า I_s เป็น 1 หรือ 2 micro-amp ที่ 25 องศาเซลเซียส แต่ที่ 100 องศาเซลเซียส จะมีค่า I_s เพิ่มขึ้นเป็น 100 micro-amp ระดับกระแสไฟฟ้าขนาดนี้จะเป็นปัญหาต่อการเปิดวงจรเรื่องจากได้รับการไบอัสกลับ เพราะแทนที่ I_D จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่กลับนำกระแสได้จำนวนหนึ่งตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.6 เส้นกราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิ (Temperature Effects)

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

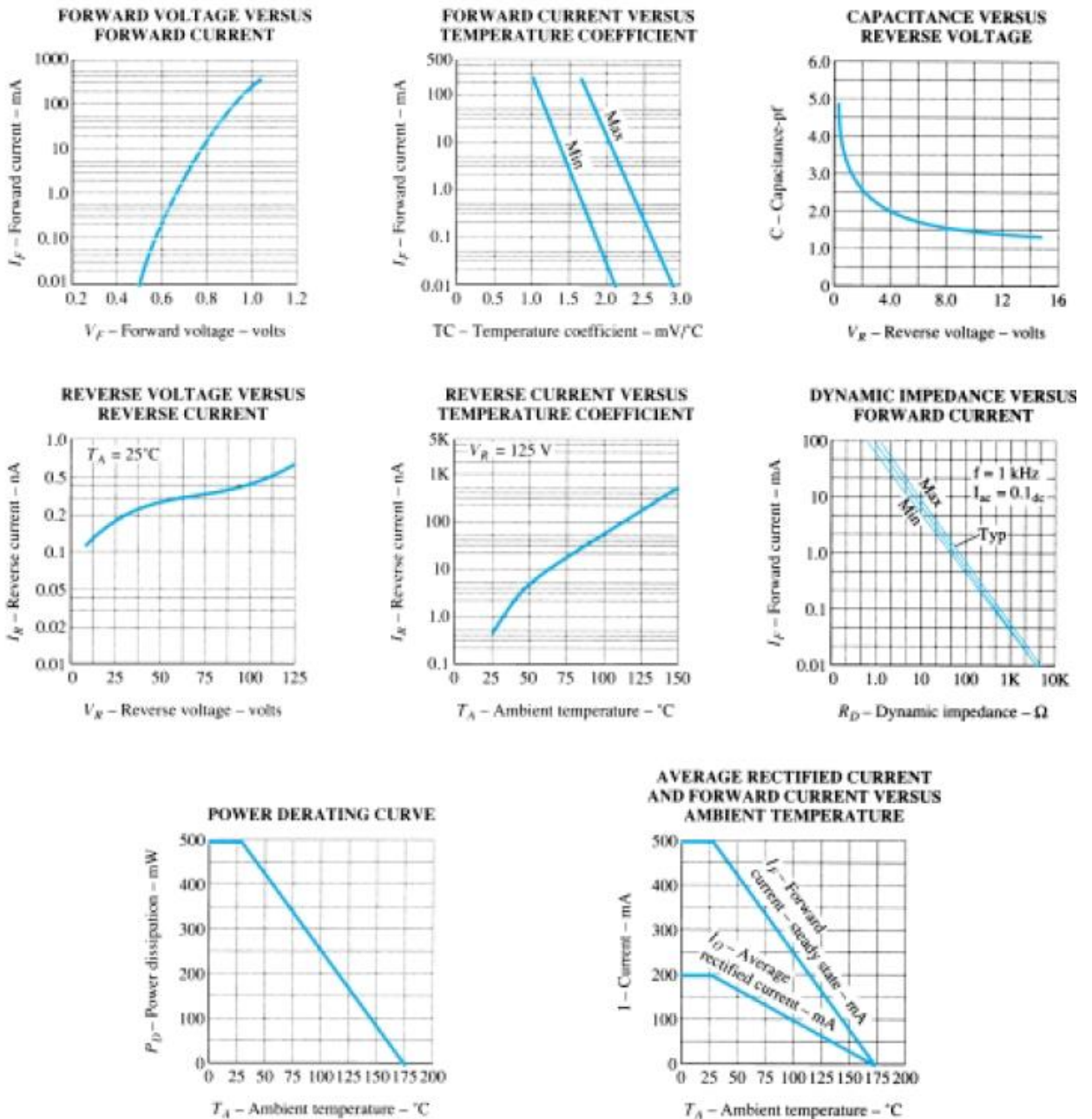
การดูพารามิเตอร์ที่สำคัญใน datasheet ของไดโอด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง Datasheet ของไดโอด

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTIC CURVES
at 25°C ambient temperature unless otherwise noted



รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง Datasheet ของไดโอด (ต่อ)

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

A: แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับขั้นต่ำ (PIVs) สำหรับไดโอดที่กระแสมัวย้อนกลับที่ระบุ

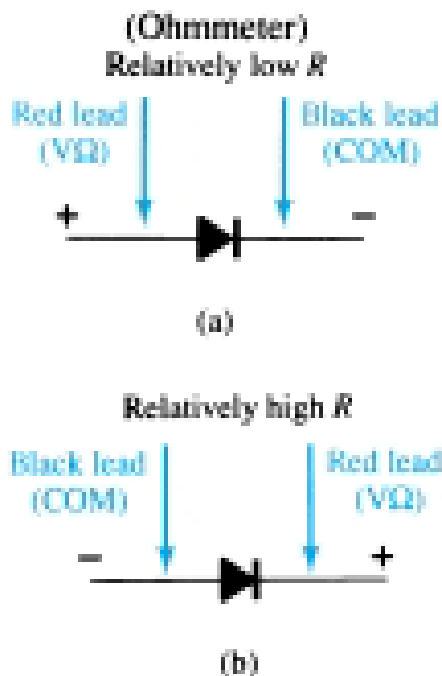
B: ลักษณะอุณหภูมิตามที่ระบุ สังเกตการใช้มาตราส่วนเซลเซียสและการใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย [จุดเยือกแข็งที่ 32 ° F = 0 ° C (H₂O) และจุดเดือด 212 ° F = 100 ° C (H₂O)]

- C: ระดับการกระจายพลังงานสูงสุด $P_D = V_{D1} = 500 \text{ mW}$ พิกัดกำลังสูงสุดจะลดลงที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง 3.33 mW ต่อองศา (25°C) ตามที่ระบุไว้อย่างชัดเจนโดยเส้นกราฟลดกำลังของรูปที่ 8
- D: กระแสไฟไบอัสตรงต่อเนื่องสูงสุด 500 mA (หมายเหตุ I_F เทียบกับอุณหภูมิในรูปที่ 8)
- E: ช่วงของค่า V_F ที่ $I_F = 200 \text{ mA}$ ที่ $V_T = 0.7 \text{ V}$ สำหรับอุปกรณ์ทั้งสอง
- F: ช่วงของค่า V_F ที่ $I_F = 1.0 \text{ mA}$ โปรตสังเกตในกรณีนี้ว่าลิมิตด้านบนบนล้อมรอบ 0.7 V .
- G: ที่ $V_R = 20 \text{ V}$ และอุณหภูมิใช้งานทั่วไป $I_R = 500 \text{ nA} = 0.5 \text{ A}$ ในขณะที่แรงดันย้อนกลับสูงขึ้น I_R ลดลงเหลือ $5 \text{ nA} = 0.005 \text{ A}$
- H: ระดับค่าตัวเก็บประจุระหว่างขั้วคือประมาณ 8 pF สำหรับไดโอดที่ $V_R = V_D = 0 \text{ V}$ (ไม่มีการไบอัส) และความถี่ที่ใช้ 1 MHz
- I: เวลาในการกู้คืนสลับกลับ (reverse recovery time) คือ 3 วินาที สำหรับเงื่อนไขการทำงาน

การใช้ไดโอดทำงานแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบไดโอด

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความต้านทานการไบอัสตรงของไดโอดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับระดับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นหากเราวัดความต้านทานของไดโอดโดยใช้การเชื่อมต่อที่ระบุในรูปที่ 9 จะอ่านค่าได้ค่อนข้างต่ำ โหมดมิเตอร์ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดโดยแบตเตอรี่ภายใน (1.5 V) ของวงจรโหมดมิเตอร์ยิ่งกระแสไฟฟ้าสูงเท่าใดระดับความต้านทานก็จะยิ่งน้อยลงเท่านั้น สำหรับสถานะการไบอัสย้อนกลับการค่าที่อ่านได้จะค่อนข้างสูงมากโดยต้องใช้หน่วยวัดความต้านทานสูงตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 9 การอ่านค่าความต้านทานสูงในทั้งสองทิศทางบ่งบอกถึงสภาวะเปิดวงจร (อุปกรณ์ชำรุด) อย่างชัดเจน ในขณะที่การอ่านค่าความต้านทานที่ได้นั้นมาก ในทั้งสองทิศทางอาจบ่งบอกถึงอุปกรณ์ที่มีการลัดวงจร



รูปที่ 2.9 การทดสอบไดโอดด้วยมัลติมิเตอร์

ที่มา: (Robert Boylestad and Louis Nashelsky)

ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

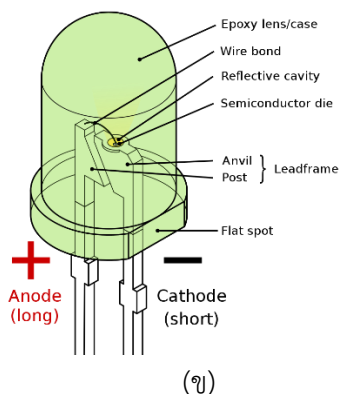
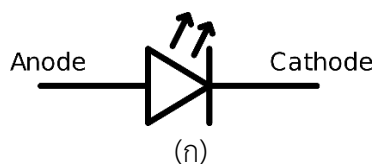
ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นำกระแสได้เมื่อได้รับไบอัสกลับ และระดับแรงดันไบอัสกลับที่นำซีเนอร์ไดโอดไปใช้งานได้เรียกว่า ระดับแรงดันพังทลายซีเนอร์ (Zener Breakdown Voltage ; V_Z) จากภาพ ทำให้ทราบว่าการทำงานของซีเนอร์ไดโอดเราจะต้องแบบไบอัสกลับกราฟแสดงคุณลักษณะของซีเนอร์ไดโอด จะเห็นได้ว่าขณะไบอัสซีเนอร์ไดโอด แรงดันไบอัสกลับ (V_r) จะมีค่าน้อยกว่า V_Z เล็กน้อย ไดโอดประเภทนี้เหมาะที่จะนำไปใช้ควบคุมแรงดันที่โหลดหรือวงจรที่ต้องการแรงดันคงที่ เช่น ประกอบอยู่ในแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง หรือโวลเทจเรกูเลเตอร์ (จะกล่าวถึงในรายละเอียดและการประยุกต์ใช้งานในบทถัดๆไป)

ไดโอดวาร์เรเตอร์หรือวาริแคป (Varactor or Varicap Diode)

ไดโอดวาร์เรเตอร์หรือวาริแคปเป็นไดโอดที่มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถปรับค่าคาปาซิแตนซ์เชื่อมต่อ (C_t) ได้โดยการปรับค่าแรงดันไบอัสกลับ ไดโอดประเภทนี้มีโครงสร้างเหมือนกับไดโอดทั่วไปและมีลักษณะ ดังรูป ขณะแรงดันไบอัสกลับ (Reverse Bias Voltage ; V_r) มีค่าต่ำ Depletion Region จะแคบลงทำให้ C_t ครอบรอบต่อมีค่าสูง แต่ในทางตรงข้ามถ้าเราปรับ V_r ให้สูงขึ้น Depletion Region จะขยายกว้างขึ้น ทำให้ C_t มีค่าต่ำ จากลักษณะดังกล่าว เราจึงนำวาริแคปไปใช้ในวงจรปรับความถี่ เช่น วงจรจูนความถี่อัตโนมัติ (Automatic Fine Tuning ; AFC) และวงจรกรองความถี่ซึ่งปรับช่วงความถี่ได้ตามต้องการ (Variable Bandpass Filter) เป็นต้น

แอลอีดี (Light Emitting Diode ; LED)

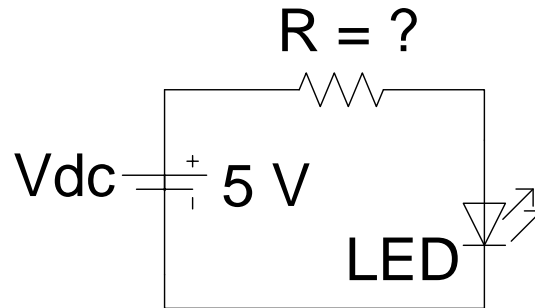
LED เป็นไดโอดที่ใช้สารประเภทแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟต์ (Gallium Arsenide Phosphide ; GaAsP) หรือสารแกลเลียมฟอสไฟต์ (Gallium Phosphide ; GaP) มาทำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n แทนสาร Si และ Ge มีสัญลักษณ์ ดังรูป



รูปที่ 2.10 แอลอีดี (Light Emitting Diode ; LED)

ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

ตัวอย่างที่ 2.2 จงคำนวณหาค่า R ที่เหมาะสมเพื่อให้ LED ทำงาน กำหนดให้ LED มีค่าแรงดัน $V_D = 0.7V$ และ กระแส $I_D = 25 \text{ mA}$.



รูปที่ 2.11 การต่อไดโอดแบบไบอัสตรง

$$R = \frac{V_{dc} - V_D}{I_D} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{5 - 0.7}{25mA}$$

$$R = 172\Omega$$

สารเหล่านี้มีคุณลักษณะพิเศษ คือ สามารถเรืองแสงได้เมื่อได้รับไบอัสตรง การเกิดแสงที่ตัว LED นี้เราเรียกว่า อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence) ปัจจุบันนิยมใช้ LED แสดงผลในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องคิดเลข, นาฬิกา เป็นต้น

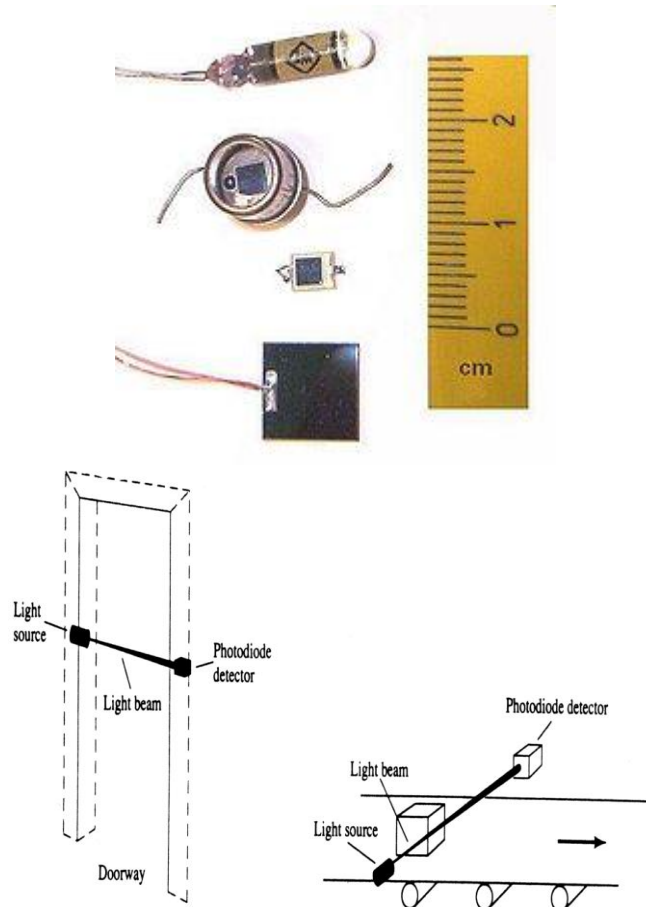
โฟโตไดโอด (Photo Diode)

โฟโตไดโอด เป็นไดโอดที่อาศัยแสงจากภายนอกผ่านเลนส์ ซึ่งฝังตัวอยู่ระหว่างรอยต่อ p-n เพื่อกระตุ้นให้ไดโอดทำงาน

การต่อโฟโตไดโอดเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ ทั้งนี้เพราะไม่ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้ไดโอดทำงานเฉพาะเมื่อมีปริมาณแสงสว่างมากพอตามที่กำหนดเสียก่อน กล่าวคือ เมื่อเลนส์ของโฟโตไดโอดได้รับแสงสว่างจะเกิดกระแสรั่วไหล ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสง มีสัญลักษณ์ ดังรูป



สัญลักษณ์ของ Photo Diode



รูปที่ 2.12 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

ที่มา : <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>

เอกสารอ้างอิง

1. https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode_transistor/diode.htm
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>

ใบงานที่ 2. การทดลองไดโอด

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของไดโอดและคุณลักษณะของไดโอด
- 1.2 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของไดโอดและสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ไดโอดเบอร์ 1N4001
4. ตัวต้านทานปรับค่าได้
5. แหล่งจ่ายไฟตรง
6. แอมป์มิเตอร์
7. โวลต์มิเตอร์

การทดลองที่ 2.1 การทดลองไดโอดด้วยโปรแกรม LTspice

วิธีการทดลอง

2.1.1 เนื่องจากใน Component ไม่มีอุปกรณ์ไดโอดเบอร์ 1N4001 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าไปดาวน์โหลด SPICE LB File จากอินเทอร์เน็ต

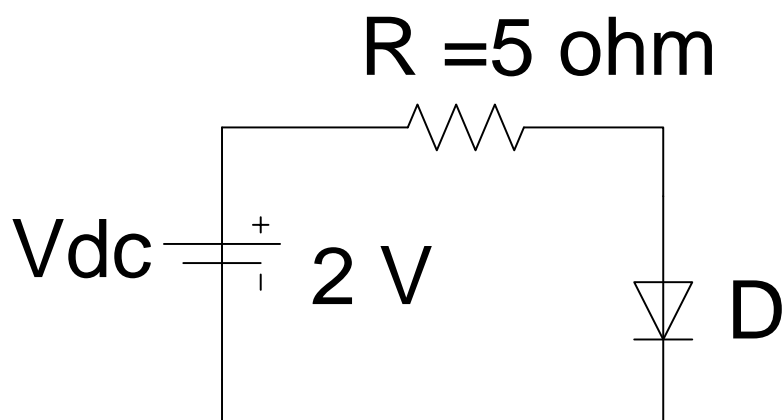


```
.MODEL D1N4001 D IS=29.5E-9 RS=73.5E-3 N=1.96 CJO=34.6P VJ=0.627
+M=0.461 BV=60 IBV=10U
```

```
.MODEL D1N4001 D IS=29.5E-9 RS=73.5E-3 N=1.96 CJO=34.6P VJ=0.627
```

```
+M=0.461 BV=60 IBV=10U
```

2.1.2 เมื่อดาวน์โหลดมาแล้วให้นำมา Add เพิ่มในวงจรดังภาพ



2.1.3 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ V_{dc} เทียบกับ I_D โดยใช้โหมด DC Sweep จาก 0 V ถึง 2 V โดยเพิ่มค่าขึ้นทีละ 0.2 V พร้อมกับวัดค่าลงในตาราง

V_{dc}	I_D (คำนวณ)	I_D (จำลอง)
0		
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		
1.8		
2.0		

2.1.4 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ V_{dc} เทียบกับ I_D โดยใช้โหมดโดยใช้ V_{dc} คงที่ ที่ 5 V แต่เปลี่ยนค่า R เป็น 2 Ω , 4 Ω , 6 Ω , 8 Ω , 10 Ω ตามลำดับ

R	I_D (คำนวณ)	I_D (จำลอง)
2 Ω		
4 Ω		
6 Ω		
8 Ω		
10 Ω		

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

การทดลองที่ 2.2 จากการทดลองในหัวข้อที่ 2.1 จงทำการต่อวงจรจริงโดยทำการทดลอง เช่นเดียวกับหัวข้อ 2.1.3 และ หัวข้อ 2.1.4 ตามลำดับ

2.2.1 ทำการทดลองพร้อมกับพล็อตกราฟ V_{dc} เทียบกับ I_D จาก 0 V ถึง 2 V โดยเพิ่มค่าขึ้นทีละ 0.2 V พร้อมกับวัดค่าลงในตาราง

V_{dc}	I_D (จำลอง)	I_D (วัดจริง)
0		
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		
1.8		
2.0		

2.1.4 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ Vdc เทียบกับ I_D โดยใช้โหมดโดยใช้ Vdc คงที่ ที่ 5 V แต่เปลี่ยนค่า R เป็น 2 Ω , 4 Ω , 6 Ω , 8 Ω , 10 Ω ตามลำดับ

R	I_D (จำลอง)	I_D (วัดจริง)
2 Ω		
4 Ω		
6 Ω		
8 Ω		
10 Ω		

บทที่ 3 การประยุกต์ใช้งานไดโอด

3.1 วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอด(DIODE)

3.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit)

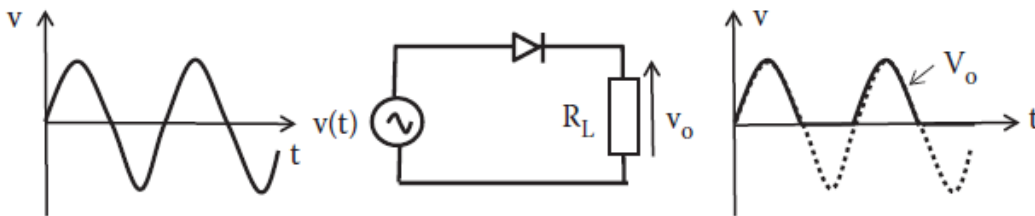
ในรูปที่ 3.1 เมื่อไดโอดได้รับการไบแอสตรง สิ่งนี้เกิดขึ้นในครึ่งรอบทางบวกของสัญญาณอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับและมีแรงดันตกคร่อมไดโอดจะอยู่ที่ประมาณ 0.7 V สำหรับซิลิกอนไดโอด กลับกันเนื่องจากครึ่งรอบทางฝั่งลบไดโอดได้รับการไบแอสแบบย้อนกลับทำให้ไดโอดไม่นำกระแสจึงเกิดการหายไปของสัญญาณอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับดังแสดง รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดสัญญาณสำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกหลังจากผลของไดโอด จึงทำให้ปรากฏแรงดันไฟฟ้าด้านบวกเท่านั้น

สำหรับสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นนี้สามารถคำนวณค่ากำลังสองค่าเฉลี่ยราก (RMS) และค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} [V] \quad (3.1)$$

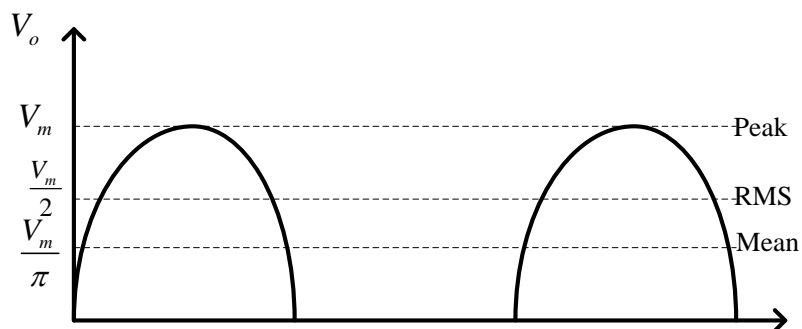
$$V_{mean} = \frac{V_m}{\pi} [V] \quad (3.2)$$

โดย V_m คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



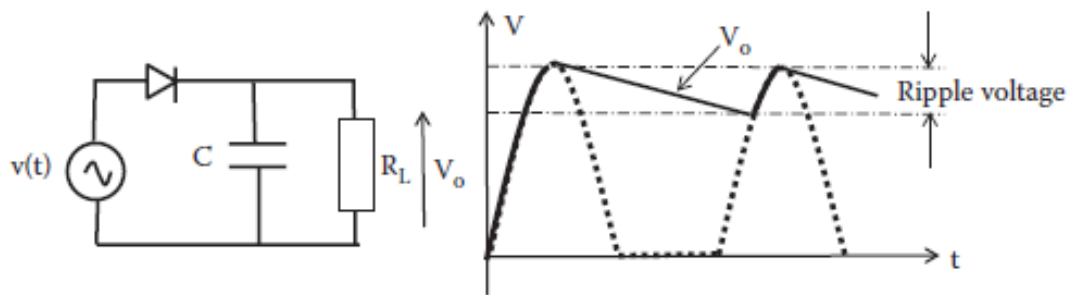
รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit)

(Fernandez-Canque, H.L.)



รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดสัญญาณสำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกหลังจากผลของไดโอด

หากมีการต่อตัวเก็บประจุ(Capacitor) ขนานกับโหลดแรงดันไฟฟ้าขาออกจะเปลี่ยนไปตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็นแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จ เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าลดลง ตัวเก็บประจุจะทำการคายประจุเนื่องจากการตอบสนองชั่วคราวการคายประจุต้องใช้เวลาและไม่สามารถทำตามแรงดันไฟฟ้าขาเข้า การคายประจุของตัวเก็บประจุจะให้เอาต์พุตที่ลดลงทีละน้อยและไม่คายประจุออกจนหมดภายในช่วงเวลาที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตเพิ่มขึ้นอีกครั้งในรอบถัดไป ผลลัพธ์ที่ออกมาคือสัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ ที่มีแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมเล็ก ๆ ที่ด้านบนดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่มีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อทำให้แรงดันเรียบขึ้น

ที่มา: Fernandez-Canque, H.L.

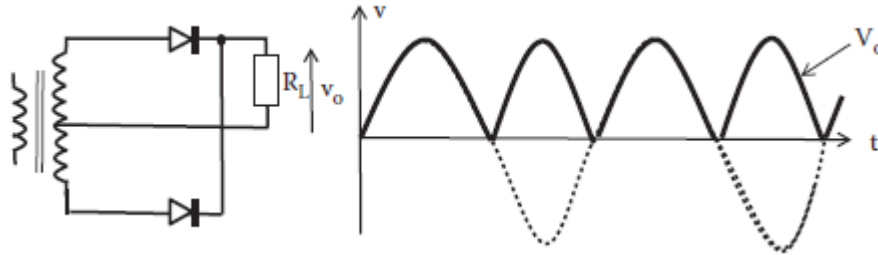
3.1.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง (Transformer center tapped full-wave rectifier circuit)

เราสามารถต่อไดโอดมากกว่าหนึ่งตัวเพื่อแก้ไขสัญญาณ ac ทั้งครึ่งรอบ หนึ่งในวงจรดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง (Center Tapped Transformer) เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นค่าที่ต้องการได้โดยไดโอดมีการเชื่อมต่อในลักษณะที่ในครึ่งรอบไดโอดหนึ่งจะมีการไบแอสตรงและอีกอันหนึ่งจะมีการไบแอสย้อนกลับ ในอีกครึ่งรอบของไดโอดทั้งสองขั้วย้อนกลับทำให้เกิดสัญญาณเอาต์พุตที่แสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนี้สามารถคำนวณค่ากำลังสองค่าเฉลี่ยราก (RMS) และค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

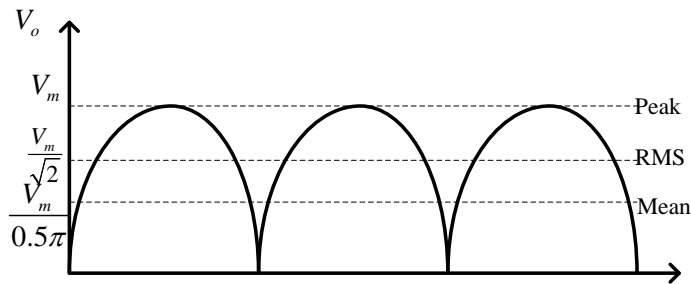
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} [V] \quad (3.3)$$

$$V_{mean} = \frac{V_m}{0.5\pi} [V] \quad (3.4)$$

โดย V_m คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



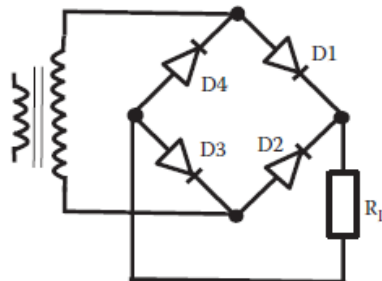
รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงที่มีแท่งกลาง
(Fernandez-Canque, H.L.)



รูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดสัญญาณสำหรับแรงดันไฟฟ้าขาออกหลังจากผลของไดโอด

3.1.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Bridge Full Wave Rectifier Circuit)

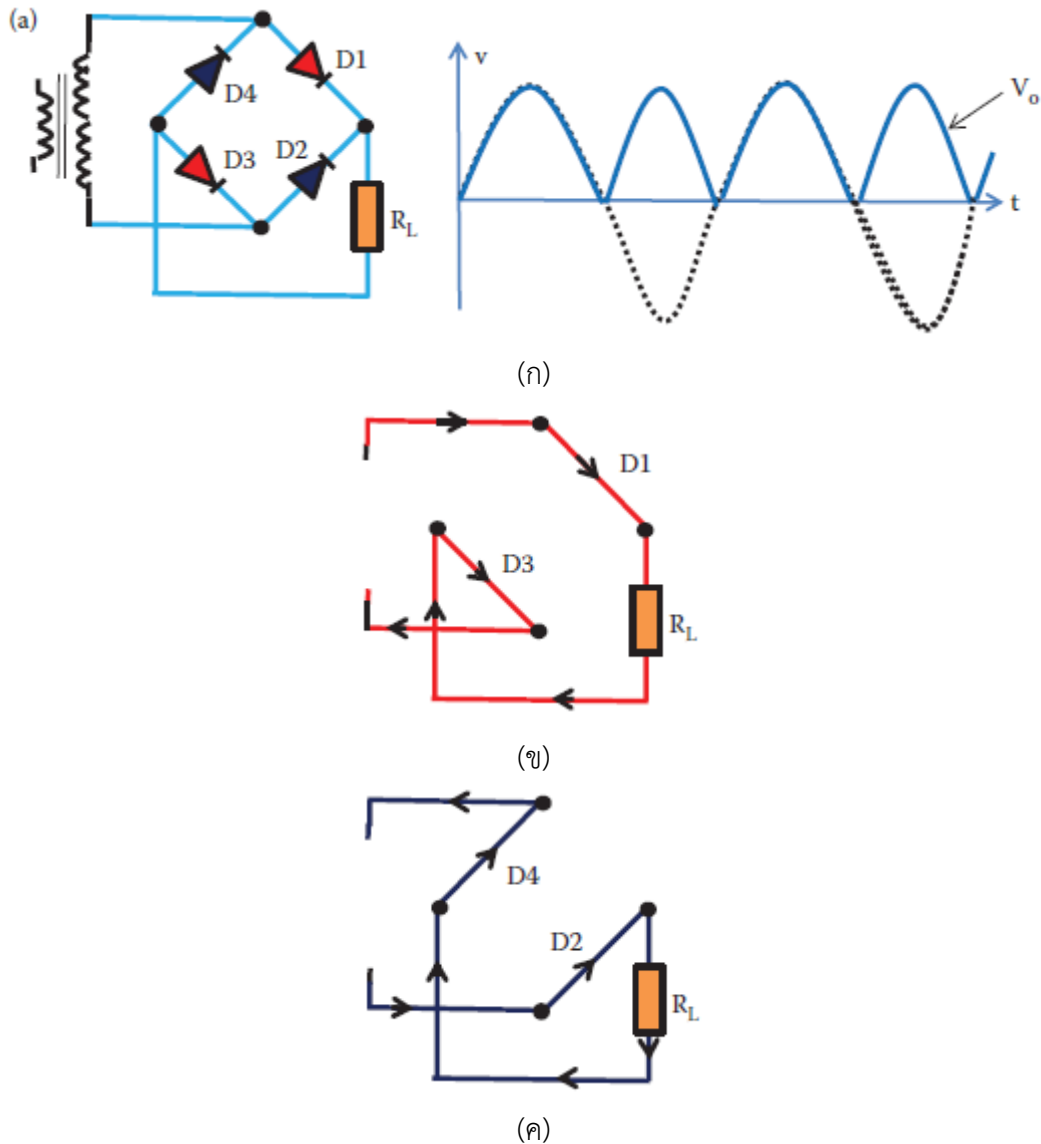
อีกวิธีหนึ่งที่สามารถเรียงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับได้เต็มคลื่นคือการใช้ไดโอดสี่ตัวที่ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเรียกว่าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเฉพาะในกรณีนี้ที่แรงดันขาออกแตกต่างจากแหล่งที่มา เช่น หม้อแปลงลดแรงดันลง



รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์(Fernandez-Canque, H.L.)

ในวงจรนี้สำหรับไดโอดจะจับคู่ทำงานพร้อมกันตามระลอกคลื่นแรงดันที่เข้ามา สำหรับครึ่งคลื่นที่เป็นบวกไดโอด D1 และ D3 จะได้รับการไบแอสตรงและไดโอด D2 และ D4 จะได้รับการไบแอสกลับ

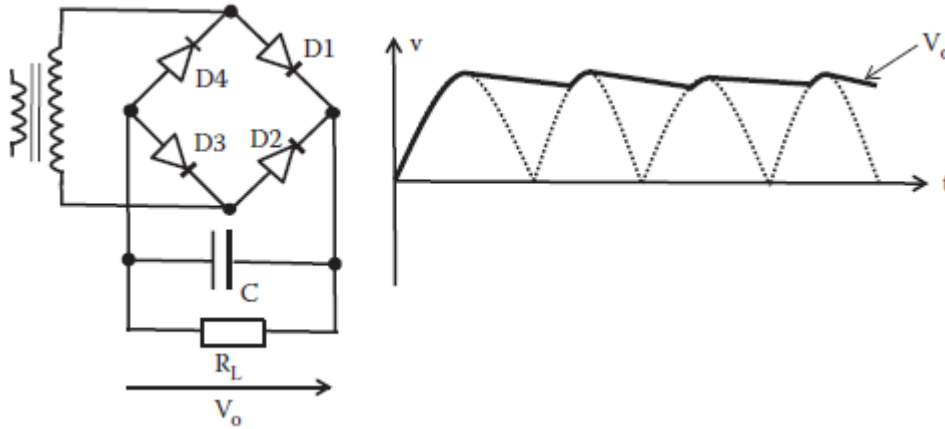
กระแสไฟฟ้าไหลเวียนตามที่ระบุในรูปที่ 3.7(ข) สำหรับไดโอดครึ่งรอบด้านลบ D2 และ D4 จะได้รับการไบแอสตรงและไดโอด D1 และ D3 จะได้รับการไบแอสกลับ และค่าการนำไฟฟ้าเป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 3.7(ค) สำหรับสัญญาณวงจรรีจกระแสบวมเต็มคลื่นนี้สามารถคำนวณค่ากำลังสองค่าเฉลี่ยราก (RMS) และค่าเฉลี่ยได้เช่นเดียวกับวงจรวจรรีจกระแสบวมเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงที่มีแท่งกลาง



รูปที่ 3.7 ภาพประกอบของการนำไฟฟ้าในวงจรรีจกระแสบวมเต็มคลื่น (ก) วงจรรีจกระแสบวมเต็มคลื่น (ข) การไบแอสตรง forward bias และ (ค) การไบแอสย้อนกลับ

ที่มา: Fernandez-Canque, H.L.

ถ้าอยากให้แรงดันเรียบจะใช้ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับโหลด (RL) จากนั้นแรงดันขาออกจะเปลี่ยนไปดังแสดงรูปที่ 3.8 เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง V_m ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จตามแรงดันไฟฟ้าขาเข้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลง ตัวเก็บประจุจะรักษาแรงดันขาออกและลดแรงดันกระแสเพื่อ



รูปที่ 3.8 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีการต่อตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันให้เรียบขึ้น
ที่มา: Fernandez-Canque, H.L.

Diode part numbers

Voltage	Through-hole axial package					Surface-mount package						
	1 A (DO-41)	1.5 A (DO-15)	3 A (DO-201AD)	6 A (R-6)	10 A (R-6)	1 A (MELF)	3 A (MELF)	1 A (SMA)	1 A (SMA)	2 A (SMB)	3 A (SMC)	5 A (SMC)
50 V	1N4001	1N5391	1N5400	6A05	10A05	SM4001	SM5400	M1	S1A	S2A	S3A	S5A
100 V	1N4002	1N5392	1N5401	6A1	10A1	SM4002	SM5401	M2	S1B	S2B	S3B	S5B
200 V	1N4003	1N5393	1N5402	6A2	10A2	SM4003	SM5402	M3	S1D	S2D	S3D	S5D
400 V	1N4004	1N5395	1N5404	6A4	10A4	SM4004	SM5404	M4	S1G	S2G	S3G	S5G
600 V	1N4005	1N5397	1N5406	6A6	10A6	SM4005	SM5406	M5	S1J	S2J	S3J	S5J
800 V	1N4006	1N5398	1N5407	6A8	10A8	SM4006	SM5407	M6	S1K	S2K	S3K	S5K
1000 V	1N4007	1N5399	1N5408	6A10	10A10	SM4007	SM5408	M7	S1M	S2M	S3M	S5M
Datasheet	[3][4][18]	[19]	[7][8][20]	[21][1]	[22][23]	[6]	[24]	[5]	[25]	[26]	[27]	[28]

รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Spec ไดโอดที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในงานเรียงกระแสฟูลบริดจ์เป็นไฟตรงที่ (พิกัดแรงดันในช่วง 50-1000 V และพิกัดกระแสในช่วง 1-10 A)

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/1N400x_general-purpose_diodes

เอกสารอ้างอิง

1. https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode_transistor/diode.htm
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>
4. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.

ใบงานที่ 3. การทดลองการประยุกต์ใช้งานไดโอด

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบต่างๆ
- 1.2 สามารถนำไดโอดไปประยุกต์ใช้งานในวงจรต่างๆได้
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของการทำงานของการนำไดโอดไปประยุกต์ใช้งานและสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

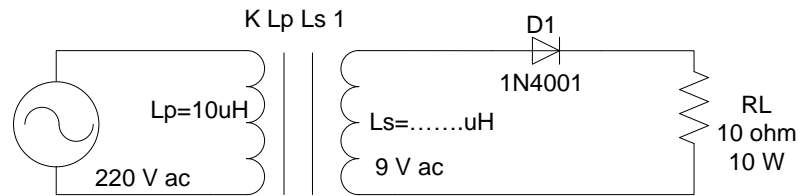
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ไดโอดเบอร์ 1N4001
4. หม้อแปลงไฟฟ้า 220 V เป็น 9 V กระแสพิกัด 500 mA แบบไม่มีแท่งกลาง
5. หม้อแปลงไฟฟ้า 220 V เป็น 12-0-12 V กระแสพิกัด 500 mA แบบมีแท่งกลาง
6. แอมป์มิเตอร์
7. โวลต์มิเตอร์
8. ออสซิลโลสโคป

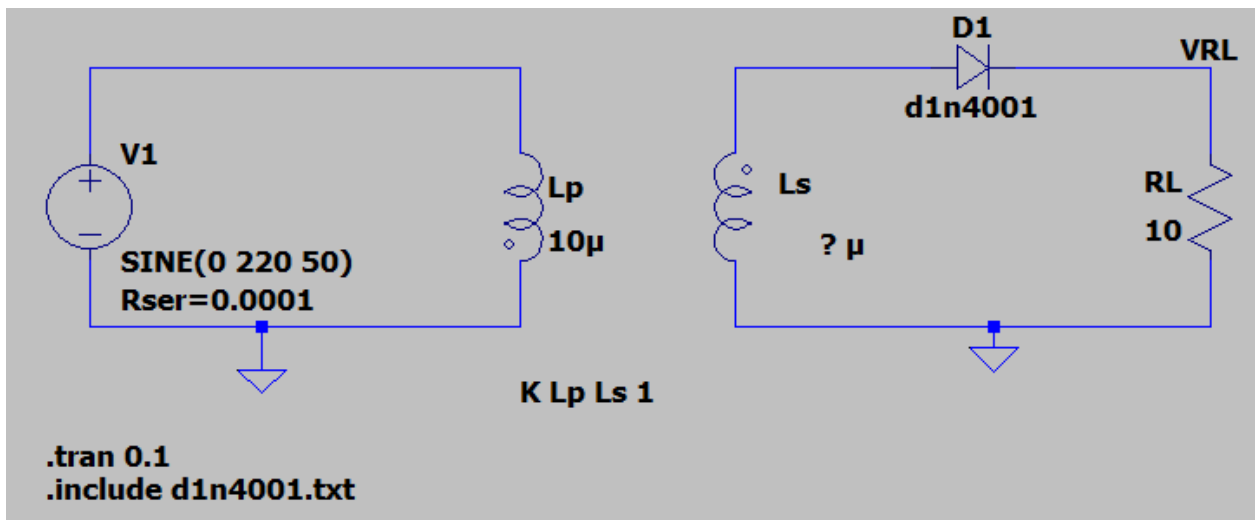
การทดลองที่ 3.1 การทดลองวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นด้วยไดโอดโดยใช้โปรแกรม LTspice

วิธีการทดลอง

3.1.1 ตัวอย่างทดลองดังภาพ ในโปรแกรม LTspice ให้ใช้ตัวเหนี่ยวนำมาทำเป็นหม้อแปลง โดยกำหนดให้ค่าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L_p = 10 \mu H$ จากนั้นให้ลองคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิโดยใช้สูตร ดังนี้



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้ในการจำลองใน LTspice

$$\frac{L_p}{L_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 \quad (3.5)$$

โดย L_p = ค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

L_s = ค่าความเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

N_p = จำนวนรอบขดปฐมภูมิของหม้อแปลง

N_s = จำนวนรอบฟุ้งทุติยภูมิของหม้อแปลง

V_p = แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

V_s = แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

ใน LTspice ให้กำหนดความสัมพันธ์ของขดลวดทั้งสองด้วยค่า K โดยกำหนดให้ค่า K=1 โดยใช้ SPICE Directive

K Lp Ls 1

จงคำนวณหาค่า L_s โดยใช้สมการที่ 3.5 โดยกำหนดให้ค่าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L_p = 10 \mu H$ ถ้าต้องการให้แรงดันทางด้านขาออกของหม้อแปลง = 9 V

$$L_s = \dots\dots\dots H$$

3.1.2 จำลองการทำงานและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

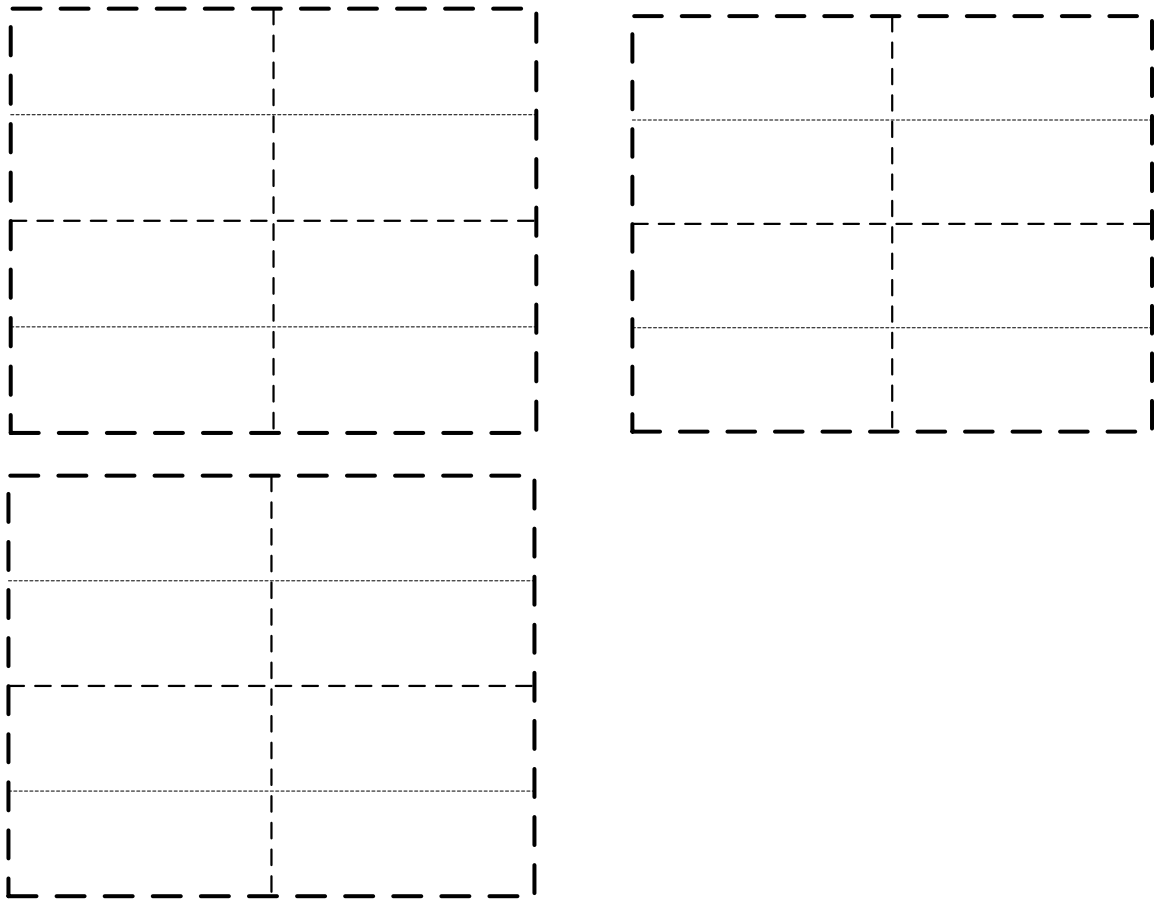
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{2} [V] \tag{3.1}$$

$$V_{mean} = \frac{V_m}{\pi} [V] \tag{3.2}$$

โดย V_m คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(จำลอง)
แรงดัน (RMS) ที่ V_{RMS}		
ค่าแรงดันเฉลี่ย V_{mean}		
ค่ากระแส (RMS) I_{RMS}		
ค่ากระแสเฉลี่ย I_{mean}		
ค่ากำลังงานเฉลี่ย $P = I_{RL_mean} \times V_{RL_mean}$		

3.1.3 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ Vs, VRL และ IRL

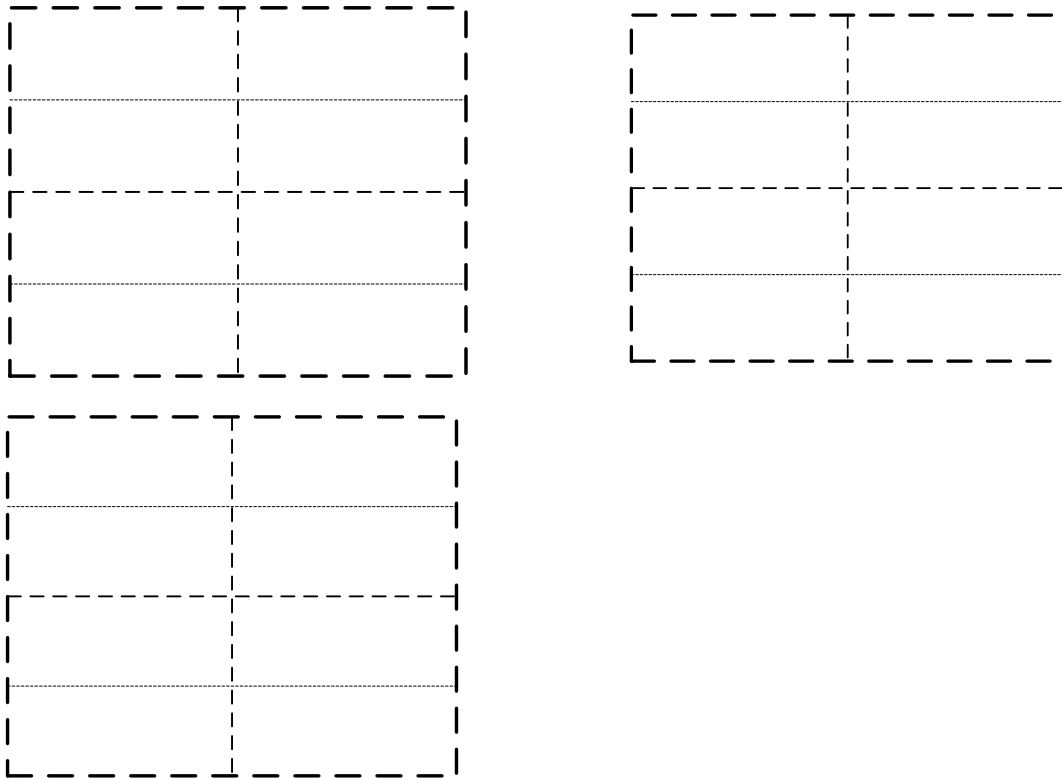


การทดลองที่ 3.2 การทดลองวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นด้วยไดโอดโดยใช้การทดลองจริง

3.2.1 ต่วงจรตามรูปที่ 3.10 ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยออสซิลโลสโคปดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(ทดลองจริง)
แรงดัน (RMS) ที่ V_{RMS}		
ค่าแรงดันเฉลี่ย V_{mean}		
ค่ากระแส (RMS) I_{RMS}		
ค่ากระแสเฉลี่ย I_{mean}		
ค่ากำลังงานเฉลี่ย $P = I_{RL_mean} \times V_{RL_mean}$		

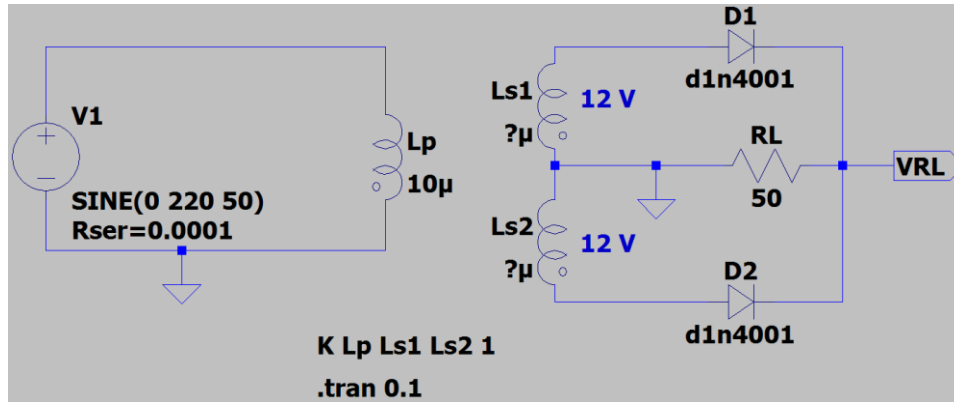
3.2.2 วัดสัญญาณต่างๆด้วยออสซิลโลสโคปดังนี้ Vs, VRL และ IRL



การทดลองที่ 3.3 การทดลองวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยไดโอดร่วมกับหม้อแปลงที่มีแท่งกลาง โดยใช้โปรแกรม LTspice

วิธีการทดลอง

3.3.1 ต่ วงจรทดลองดังภาพ ในโปรแกรม LTspice ให้ใช้ตัวเหนี่ยวนำมาทำเป็นหม้อแปลง โดยกำหนดให้ค่าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L_p = 10 \mu H$ จากนั้นให้ลองคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิโดยใช้สูตร ดังนี้



รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ในการจำลองใน LTspice

$$\frac{L_p}{L_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 \quad (3.5)$$

โดย L_p = ค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

L_s = ค่าความเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

N_p = จำนวนรอบขดปฐมภูมิของหม้อแปลง

N_s = จำนวนรอบขดทุติยภูมิของหม้อแปลง

V_p = แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

V_s = แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

ใน LTspice ให้กำหนดความสัมพันธ์ของขดลวดทั้งสองด้วยค่า K โดยกำหนดให้ค่า K=1 โดยใช้ SPICE Directive

K Lp Ls1 Ls2 1

จงคำนวณหาค่า L_{s1} และ L_{s2} โดยใช้สมการที่ 3.5 โดยกำหนดให้ค่าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L_p = 10 \mu H$ ถ้าต้องการให้แรงดันทางด้านขาออกของหม้อแปลง = 12-0-12 V

$L_{s1} = \dots\dots\dots H$

$L_{s2} = \dots\dots\dots H$

3.3.2 จำลองการทำงานและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

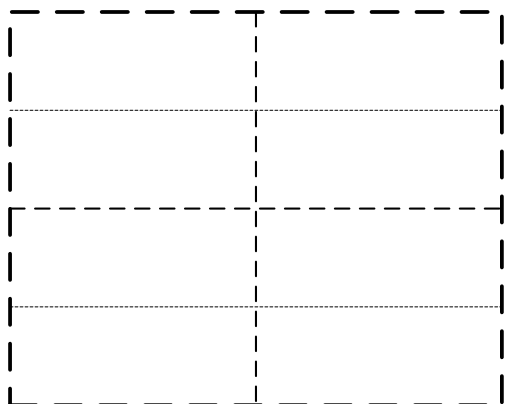
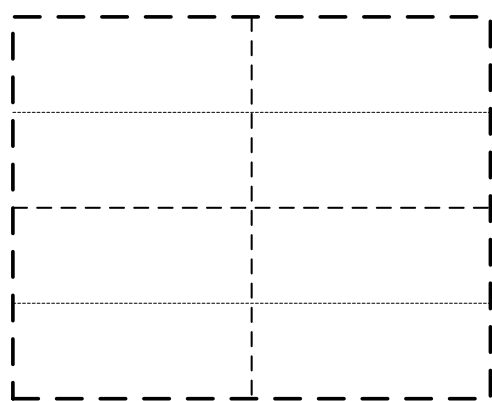
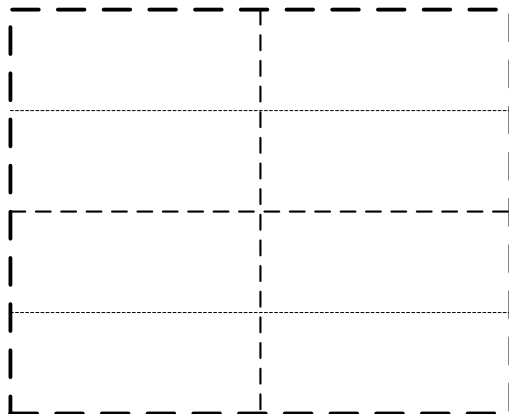
$$V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} [V] \tag{3.3}$$

$$V_{mean} = \frac{V_m}{0.5\pi} [V] \tag{3.4}$$

โดย V_m คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(จำลอง)
แรงดัน (RMS) ที่ V_{RMS}		
ค่าแรงดันเฉลี่ย V_{mean}		
ค่ากระแส (RMS) I_{RMS}		
ค่ากระแสเฉลี่ย I_{mean}		
ค่ากำลังงานเฉลี่ย $P = I_{RL_mean} \times V_{RL_mean}$		

3.3.3 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ Vs, VRL และ IRL

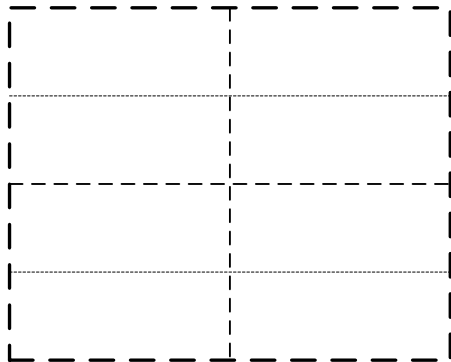
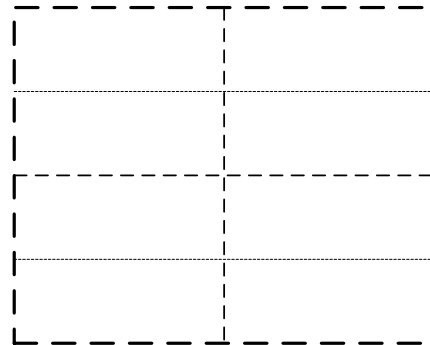
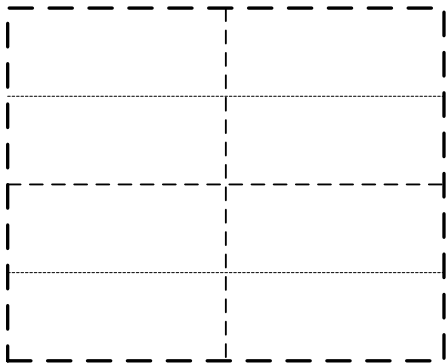


การทดลองที่ 3.4 การทดลองวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นด้วยไดโอดโดยใช้การทดลองจริง

3.4.1 ต่ วงจรตามรูปที่ 3.12 ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยออสซิลโลสโคปดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(ทดลองจริง)
แรงดัน (RMS) ที่ V_{RMS}		
ค่าแรงดันเฉลี่ย V_{mean}		
ค่ากระแส (RMS) I_{RMS}		
ค่ากระแสเฉลี่ย I_{mean}		
ค่ากำลังงานเฉลี่ย $P = I_{RL_mean} \times V_{RL_mean}$		

3.4.2 วัดสัญญาณ V_{s1} , V_{RL} และ I_{RL} ด้วยออสซิลโลสโคป



บทที่ 4 ซีเนอร์ไดโอด

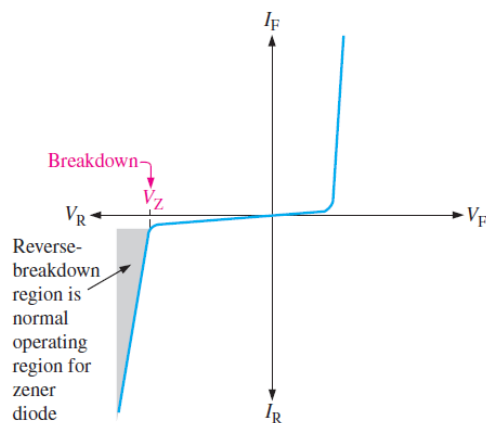
4.1 ทฤษฎีการทำงานของซีเนอร์ไดโอด

สัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอดแสดงในรูปที่ 4.1 แทนที่จะเป็นเส้นตรงแทนแคโทดเหมือนกับไดโอดโดยทั่วไป แต่ซีเนอร์ไดโอดจะมีเส้นงอที่เตือนให้ถึงตัวอักษร Z (สำหรับซีเนอร์) ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อซิลิคอน PN Junction ที่ออกแบบมาสำหรับการทำงานในการไบแอสแบบย้อนกลับ แรงดันไฟฟ้าสลาย (Breakdown voltage) ของซีเนอร์ไดโอดถูกกำหนดโดยการควบคุมระดับสารโด๊ปในระหว่างการผลิต จากการอธิบายเกี่ยวกับเส้นโค้งคุณลักษณะของไดโอดธรรมดาในบทที่ 2 พบว่าเมื่อไดโอดทำงานจนถึงแรงดันไฟฟ้าสลาย (Breakdown voltage) ในกรณีที่มีการไบแอสแบบย้อนกลับแรงดันไฟฟ้ายังคงเกือบคงที่แม้ว่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากและนี่คือจุดสำคัญในการทำงานของซีเนอร์ไดโอด คุณลักษณะของแรงดัน - กระแสนี้แสดงดังแสดงที่ในรูปที่ 4.2 ด้วยพื้นที่การทำงานปกติสำหรับไดโอดซีเนอร์แสดงเป็นพื้นที่แรเงา



รูปที่ 4.2 สัญลักษณ์และรูปร่างหน้าตาของซีเนอร์ไดโอด

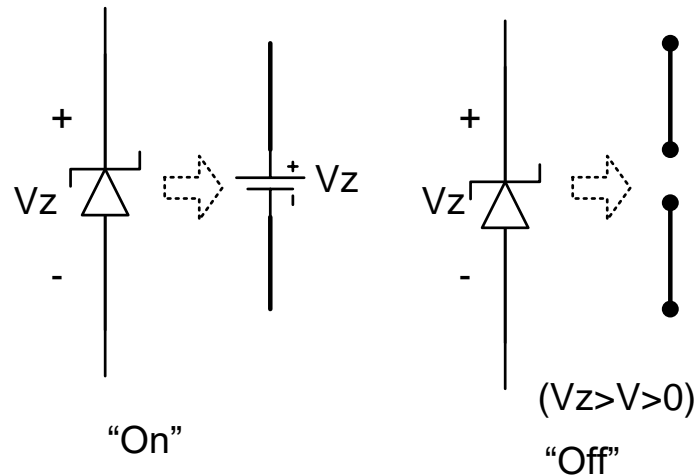
ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Zener_diode



รูปที่ 4.2 กราฟคุณลักษณะของซีเนอร์ไดโอด

ที่มา : Thomas L. Floyd

การวิเคราะห์วงจรที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดค่อนข้างคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ไดโอดทั่วไปในส่วนบทก่อนหน้านี้
ขั้นแรกจะต้องกำหนดสถานะของไดโอดและการแทนที่โมเดลที่เหมาะสมและการกำหนดวงจรที่ไม่ทราบจำนวนอื่น
ๆ เว้นแต่จะระบุไว้เป็นอย่างอื่นโมเดล Zener ที่จะใช้สำหรับสถานะ “เปิด” (“On”) จะเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 4.3
สำหรับสถานะ “ปิด” (“Off”) ตามที่กำหนดโดยแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า V_Z แต่มากกว่า 0 โวลต์ พร้อมชี้ที่ระบุใน
รูปที่ 4.3 ค่าเทียบเท่าของซีเนอร์คือวงจรเปิดที่แสดงในรูปเดียวกัน



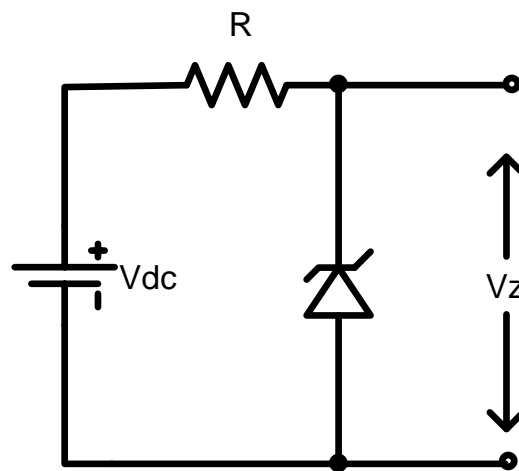
รูปที่ 4.3 วงจรเทียบเท่าของซีเนอร์ไดโอด

สองตัวอย่างแรกจะแสดงให้เห็นว่าซีเนอร์ไดโอดสามารถใช้เพื่อสร้างระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและทำ
หน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างไร การใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวควบคุมจะได้รับการอธิบายโดยละเอียดเนื่องจาก
เป็นหนึ่งในพื้นที่หลักของการใช้งาน ตัวควบคุมคือการรวมกันขององค์ประกอบที่ออกแบบมาเพื่อให้แน่ใจว่า
แรงดันไฟฟ้าขาออกของแหล่งจ่ายยังคงที่ค่อนข้างคงที่

ตัวอย่างที่ 4.1 จากวงจรรูปที่ 4.4 จงคำนวณหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อให้ซีเนอร์ไดโอดทำงาน โดยสมมติว่าซีเนอร์ไดโอดมีค่า $V_Z = 6 \text{ V}$ กระแส $I_Z = 60 \text{ mA}$ กระแส $I_{ZK} = 60 \text{ mA}$, $V_{dc} = 9 \text{ V}$

$$R = \frac{V_{dc} - V_Z}{\Delta I_Z} [\Omega] \quad (4.1)$$

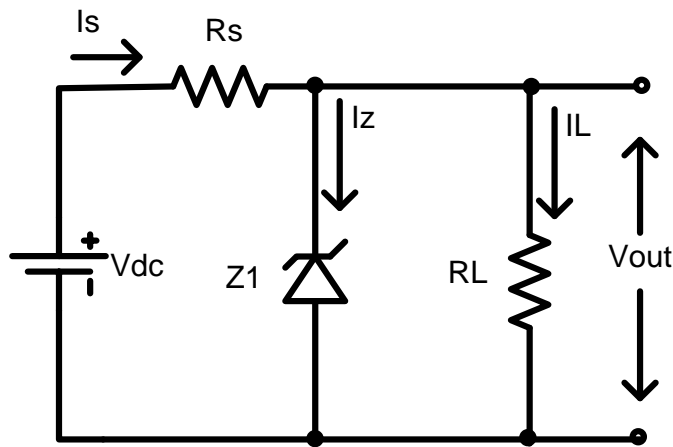
$$R = \frac{9 - 6}{(0.06 - 0.001)} [\Omega] = 50.847 \Omega$$



รูปที่ 4.4 วงจรซีเนอร์ไดโอด

ตัวอย่างที่ 4.2 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4733A มี $V_Z = 5.1\text{ V}$ $I_Z = 49\text{ mA}$ $R_Z = 7\ \Omega$ และ $PD(\text{max}) = 1\text{ W}$ (ดูอ้างอิงจากรูปที่ 4.6) จงหาค่า V_{RS} I_{RS} และ I_L ของวงจรซีเนอร์ในรูปที่ 4.5 $V_{dc} = 15\text{ V}$, $R_S = 500\ \Omega$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$

วิธีทำ



รูปที่ 4.5 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

การวิเคราะห์หากกระแส I_Z ที่ไหลผ่าน

$$V_{OUT} = V_Z - (\Delta I_Z \times R_Z) = V_Z - (I_Z - I_{ZK}) \times R_Z \quad (4.2)$$

$$= 5.1 - (0.049 - 0.001) \times 7$$

$$= 4.764\text{ V}$$

$$V_{RS} = V_{dc} - V_{OUT} = 15 - 4.764 \quad (4.3)$$

$$= 10.236\text{ V}$$

$$I_{RS} = \frac{V_{dc} - V_{OUT}}{R_S} = \frac{15 - 4.764}{500} \quad (4.4)$$

$$= 0.02047\text{ A}$$

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{4.764}{1\text{ k}\Omega} \quad (4.5)$$

$$= 4.764\text{ mA}$$

Type	Nominal Zener voltage ⁽¹⁾ at IZT VZ V	Test current IZT mA	Maximum Zener impedance ⁽¹⁾			Maximum reverse leakage current		Surge current at TA = 25°C IR mA	Maximum regulator current ⁽²⁾ IZM mA
			ZzT at IZT Ω	ZzK Ω	at IZK mA	IR μA	at VR V		
1N4728	3.3	76	10	400	1.0	100	1	1380	276
1N4729	3.6	69	10	400	1.0	100	1	1260	252
1N4730	3.9	64	9	400	1.0	50	1	1190	234
1N4731	4.3	58	9	400	1.0	10	1	1070	217
1N4732	4.7	53	8	500	1.0	10	1	970	193
1N4733	5.1	49	7	550	1.0	10	1	890	178
1N4734	5.6	45	5	600	1.0	10	2	810	162
1N4735	6.2	41	2	700	1.0	10	3	730	146
1N4736	6.8	37	3.5	700	1.0	10	4	660	133
1N4737	7.5	34	4.0	700	0.5	10	5	605	121
1N4738	8.2	31	4.5	700	0.5	10	6	550	110
1N4739	9.1	28	5.0	700	0.5	10	7	500	100
1N4740	10	25	7	700	0.25	10	7.6	454	91
1N4741	11	23	8	700	0.25	5	8.4	414	83
1N4742	12	21	9	700	0.25	5	9.1	380	76
1N4743	13	19	10	700	0.25	5	9.9	344	69
1N4744	15	17	14	700	0.25	5	11.4	304	61
1N4745	16	15.5	16	700	0.25	5	12.2	285	57
1N4746	18	14	20	750	0.25	5	13.7	250	50
1N4747	20	12.5	22	750	0.25	5	15.2	225	45
1N4748	22	11.5	23	750	0.25	5	16.7	205	41
1N4749	24	10.5	25	750	0.25	5	18.2	190	38
1N4750	27	9.5	35	750	0.25	5	20.6	170	34
1N4751	30	8.5	40	1000	0.25	5	22.8	150	30
1N4752	33	7.5	45	1000	0.25	5	25.1	135	27
1N4753	36	7.0	50	1000	0.25	5	27.4	125	25
1N4754	39	6.5	60	1000	0.25	5	29.7	115	23
1N4755	43	6.0	70	1500	0.25	5	32.7	110	22
1N4756	47	5.5	80	1500	0.25	5	35.8	95	19
1N4757	51	5.0	95	1500	0.25	5	38.8	90	18
1N4758	56	4.5	110	2000	0.25	5	42.6	80	16
1N4759	62	4.0	125	2000	0.25	5	47.1	70	14
1N4760	68	3.7	150	2000	0.25	5	51.7	65	13
1N4761	75	3.3	175	2000	0.25	5	56.0	60	12
1N4762	82	3.0	200	3000	0.25	5	62.2	55	11
1N4763	91	2.8	250	3000	0.25	5	69.2	50	10
1N4764	100	2.5	350	3000	0.25	5	76.0	45	9

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างสรุปคุณลักษณะของซีเนอร์ไดโอดตระกูล 1N47xx

(ที่มา : <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/61851/GE/1N4733.htmlX>)

ตัวอย่างที่ 4.3 กำหนดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรรูปที่ 4.7 โดยใช้ LED สีขาวเพื่อระบุว่ากำลังเปิดอยู่ จงหาค่ากระแสไฟที่ไหลผ่าน LED และพลังงานที่ส่งจากแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่าใด? พลังงานที่ถูกใช้ไปโดย LED เป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับซีเนอร์ไดโอด 6-V?

วิธีทำ ก่อนอื่นต้องตรวจสอบว่ามีแรงดันไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้ไดโอดที่ต่ออนุกรมกันทั้งหมด LED สีขาว จะมีการลดลงประมาณ 4 V โดยไดโอดซีเนอร์ 6-V และ 3.3-V มีทั้งหมด 9.3 V และไดโอดซิลิกอนที่มีการไบแอสตรงมีค่าเท่ากับ 0.7 V รวมเป็น 14 V. ดังนั้นแรงดันจากแหล่งจ่าย 40 V ที่ใช้ก็เพียงพอที่จะเปิดทำให้อุปกรณ์ทั้งหมดทำงานและมีกระแสไฟไหลผ่านที่เหมาะสม

ไดโอดแบบซิลิกอนใช้เป็นตัวอ้างอิงแรงดันที่ 4 โวลต์ เพราะว่า

$$V_{O1} = V_{Z2} + V_K = 3.3 + 0.7 = 4.0[V]$$

และเมื่อรวมแรงดันซีเนอร์ไดโอด 6 โวลต์ กับแรงดันอ้างอิง 4 โวลต์จะได้

$$V_{O2} = V_{O1} + V_{Z1} = 4 + 6 = 10[V]$$

และสามารถหาค่ากระแสที่ไหลผ่าน LED ได้จาก

$$I_R = I_{LED} = \frac{V_R}{R} = \frac{40 - V_{O2} - V_{LED}}{1.3k\Omega} = \frac{40 - 10 - 4}{1.3k\Omega} = 20mA$$

พลังงานที่ส่งจากแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับ

$$P = V_S I_R = 40 \times 0.02 = 0.8W$$

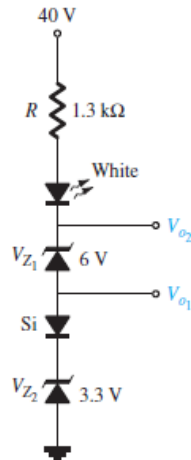
พลังงานที่ LED มีค่าเท่ากับ

$$P_{LED} = V_{LED} I_{LED} = 4 \times 0.02 = 0.08W$$

พลังงานที่ซีเนอร์ไดโอด 6 โวลต์ มีค่าเท่ากับ

$$P_Z = V_Z I_Z = 6 \times 0.02 = 0.12W$$

พลังงานที่ดูดซับโดยซีเนอร์ไดโอดเกินกว่า LED = 0.04 W



รูปที่ 4.7 วงจรซีเนอร์ไดโอดที่ใช้สำหรับอ้างอิงในตัวอย่างี่ 4.3 (Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky)

เอกสารอ้างอิง

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Zener_diode https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>
3. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
4. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.

ใบงานที่ 3. ซีเนอร์ไดโอด

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของซีเนอร์ไดโอด
- 1.2 สามารถนำซีเนอร์ไดโอดไปประยุกต์ใช้งานในวงจรต่างๆได้
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของการทำงานของการนำซีเนอร์ไดโอดไปประยุกต์ใช้งานและสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

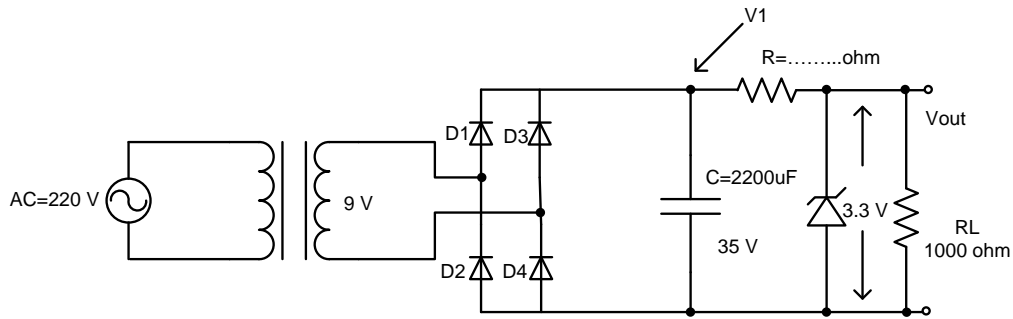
1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4728
4. ไดโอดเบอร์ 1N4001
5. หม้อแปลงไฟฟ้า 220 V เป็น 9 V กระแสพิกัด 500 mA แบบไม่มีแท่งกลาง
6. แอมป์มิเตอร์
7. โวลต์มิเตอร์
8. ออสซิลโลสโคป
9. LED

การทดลองที่ 4.1 การทดลองวงจรซีเนอร์ไดโอดโดยใช้โปรแกรม LTspice

วิธีการทดลอง

4.1.1 ตัวอย่างการทดลองดังภาพ ในโปรแกรม LTspice ให้ใช้ตัวเหนี่ยวนำมาทำเป็นหม้อแปลง โดยกำหนดให้ค่าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L1 = 10 \mu H$ จากนั้นให้ลองคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิเพื่อให้ได้แรงดันขาออก 9 V โดยดูแนวทางจากบทที่ผ่านมาโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4728 ($Vz=3.3 V$) ถ้า LTspice ไม่มีให้ Add Spice model และเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่าง L1 และ L2 ด้วย SPICE Directive

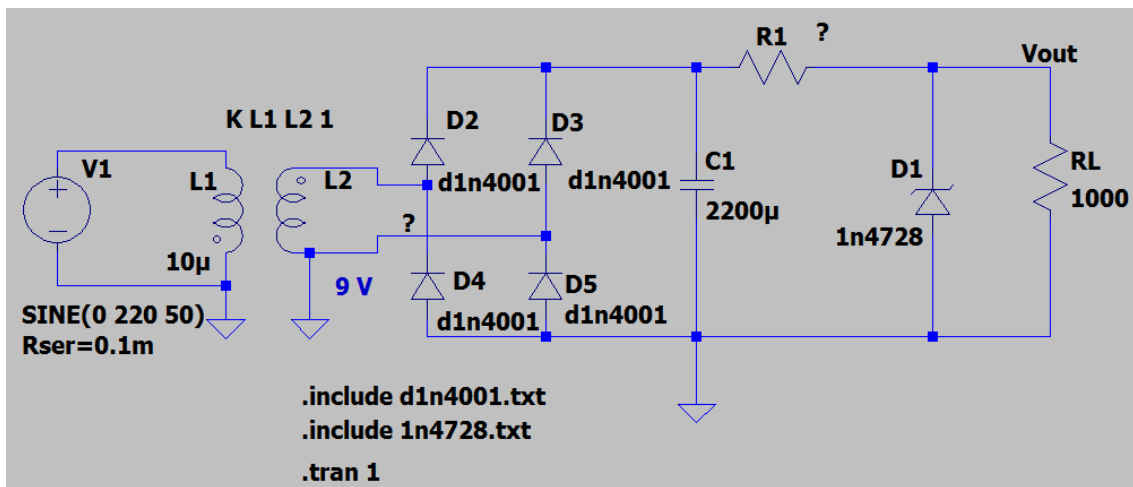
K L1 L2 1



รูปที่ 4.8 วงจรที่ใช้ในการจำลอง

จงคำนวณหาค่า R ที่จะใช้ต่อกับซีเนอร์ไดโอดตามแนวทางตัวอย่างที่ 4.2

R =

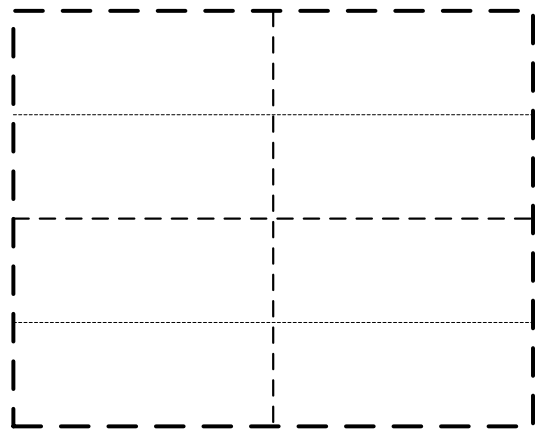
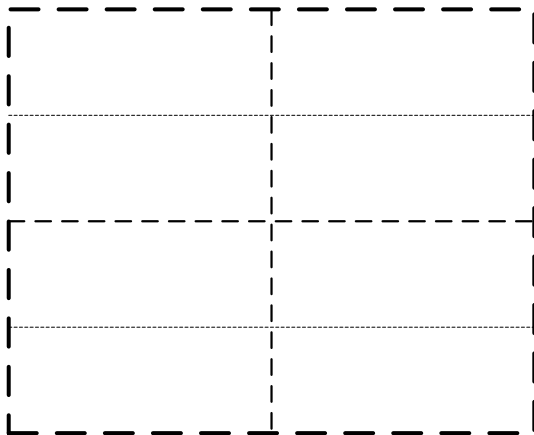


รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ในการจำลองใน LTspice

4.1.2 คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ


พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(จำลอง)
ค่าตัวต้านทาน R1		X
แรงดันที่ตัวต้านทาน R1 V_{R1}		
กระแสที่ตัวต้านทาน R1 I_{R1}		
แรงดัน Output V_{OUT}		
กระแสที่ตัวต้านทาน RL I_{RL}		
ค่าพลังงานที่สูญเสียในตัวต้านทานโหลด $PL = I_{RL} \times V_{RL}$ W		
ค่าพลังงานที่สูญเสียในซีเนอร์ไดโอด $Pz = I_z \times V_z$ W		

4.1.3 จำลองการทำงานพร้อมกับพล็อตกราฟ Vz และ Iz, Vout และ IRL

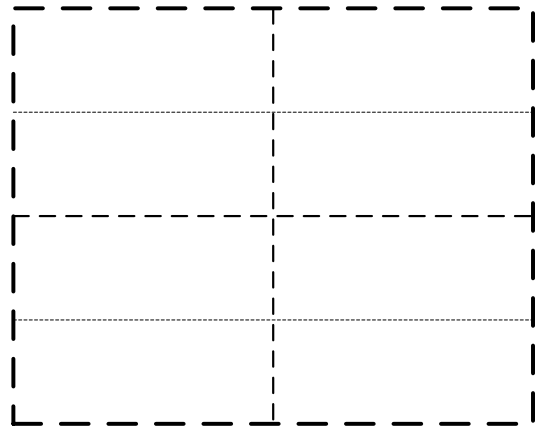
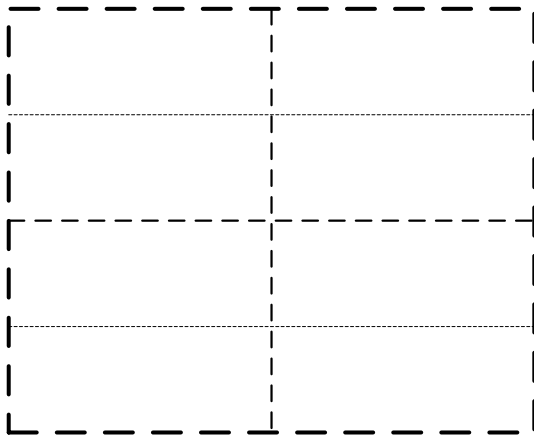


การทดลองที่ 4.2 การทดลองวงจรซีเนอร์ไดโอดโดยใช้การทดลองจริง

4.2.1 ทำการต่อวงจรจริงพร้อมกับวัดค่าต่างๆ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(วัดจริง)
ค่าตัวต้านทาน R1		
แรงดันที่ตัวต้านทาน R1 V_{R1}		
กระแสที่ตัวต้านทาน R1 I_{R1}		
แรงดัน Output V_{OUT}		
กระแสที่ตัวต้านทาน RL I_{RL}		
ค่าพลังงานที่สูญเสียในตัวต้านทานโหลด $PL = I_{RL} \times V_{RL} \quad W$		
ค่าพลังงานที่สูญเสียในซีเนอร์ไดโอด $PZ = I_Z \times V_Z \quad W$		

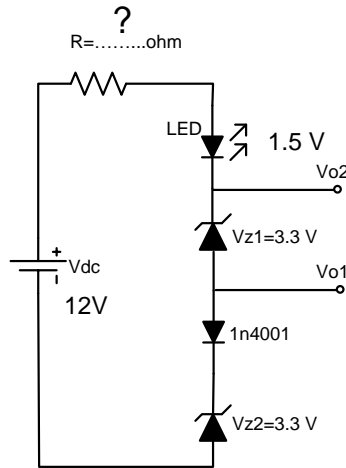
4.2.2 ใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณต่างๆดังนี้ V_z และ I_z , V_{out} และ I_{RL}



การทดลองที่ 4.3 จงทดลองวงจรซีเนอร์ไดโอดโดยใช้โปรแกรม LTspice และเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริง

วิธีการทดลอง

4.3.1 ต่ วงจรทดลองดังภาพโดยต้องคำนวณค่า R ที่จะทำให้ LED ทำงานโดย LED มีค่า $V_d = 1.5\text{ V}$ และกระแสขณะทำงานประมาณ 25 mA โดย



4.3.2 จงแสดงวิธีคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แนวทางจากตัวอย่างที่ 4.3

พารามิเตอร์	(คำนวณ)	(จำลอง)	(วัดจริง)
ค่าตัวต้านทาน R		X	X
แรงดันที่ตัวต้านทาน R V_R			
กระแสที่ตัวต้านทาน R I_R			
แรงดัน V_{O1}			
แรงดัน V_{O2}			
ค่าพลังงานที่สูญเสียในตัวต้านทาน R1 $PL = I_{RL} \times V_{RL} \text{ W}$			
ค่าพลังงานที่สูญเสียรวมในซีเนอร์ไดโอดทั้ง 2 ตัว $Pz(\text{Total}) = (I_z \times V_z) \times 2 \text{ W}$			

สรุปผลการทดลอง

.....

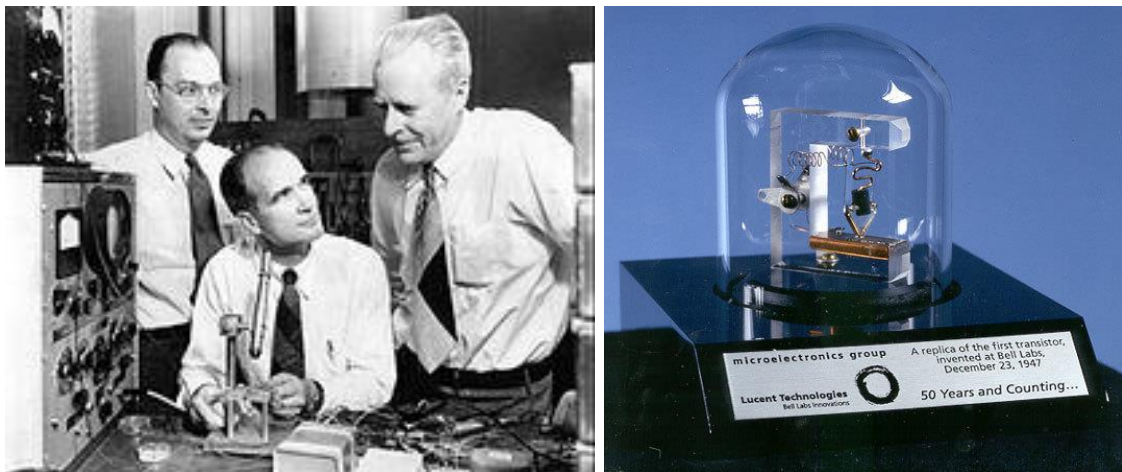
.....

.....

บทที่ 5 ทรานซิสเตอร์

5.1 ประวัติของทรานซิสเตอร์

ในช่วงปี พ.ศ. 2447 ถึง พ.ศ. 2490 (ค.ศ.1904 ถึง ค.ศ.1947) หลอดสุญญากาศเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจและมีการพัฒนา ในปี พ.ศ. 2447(ค.ศ.1904) J. A. Fleming ได้นำไดโอดแบบหลอดสุญญากาศมาใช้ หลังจากนั้นไม่นานในปี ค.ศ.1906 ลีเดอเฟอร์สท์ (Lee De Forest) ได้เพิ่มองค์ประกอบที่สามเรียกว่ากริดควบคุมลงในไดโอดแบบหลอดสุญญากาศส่งผลให้เกิดไตรโอดแอมพลิฟายเออร์ตัวแรก ในปีต่อ ๆ มาวิทยุและโทรทัศน์ได้กระตุ้นอุตสาหกรรมการผลิตหลอดสุญญากาศเป็นอย่างมาก ส่งผลให้การผลิตเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1 ล้านหลอดในปี ค.ศ.1922 เป็นประมาณ 100 ล้านหลอดในปี 1937 อย่างไรก็ตามในวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2490 (ค.ศ.1947) อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะได้สัมผัสกับทิศทางใหม่ซึ่งจะพลิกโฉมวงการอิเล็กทรอนิกส์ของโลกไปโดยสิ้นเชิง เมื่อบายของวันนี้ วันที่ Dr. S. William Shockley, Walter H. Brattain และ John Bardeen แสดงให้เห็นถึงการขยายสัญญาณของทรานซิสเตอร์ตัวแรกที่ Bell Telephone Laboratories ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ทรานซิสเตอร์ดั้งเดิม (ทรานซิสเตอร์แบบจุดสัมผัส) ดังแสดงในรูปที่ 5.1(ขวา) ข้อดี ของอุปกรณ์โซลิดสเตตสามขั้วเหนือท่อนี้เห็นได้ชัดคือมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา นอกจากนี้ยังอุปกรณ์ที่คิดค้นขึ้นมายังไม่จำเป็นต้องมีตัวทำความร้อน(Heater) เพื่อกระตุ้นการทำงานเหมือนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลอดสุญญากาศ มันมีโครงสร้างที่แข็งแรง และมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากอุปกรณ์ใช้พลังงานน้อยลงและสามารถทำงานที่แหล่งจ่ายไฟค่าน้อยๆได้

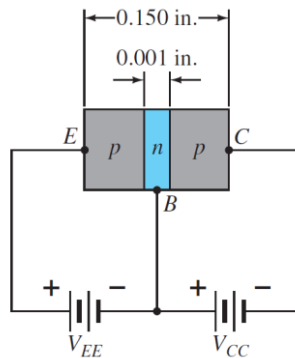


รูปที่ 5.1 (รูปทางซ้าย)ผู้ที่คิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นกลุ่มแรก ประกอบไปด้วย John Bardeen, Dr. S. William Shockley และ Walter Brattain ที่ Bell Labs ปี พ.ศ. 2491(ค.ศ.1948) พวกเขาได้ประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์แบบจุดสัมผัส (รูปทางขวา) ในปี พ.ศ. 2490 (ค.ศ.1947) และทรานซิสเตอร์ขั้วต่อสองขั้วในปี พ.ศ. 2491(ค.ศ.1948)

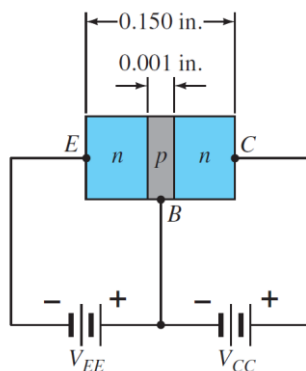
ที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>

5.2 ทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์สามชั้นซึ่งประกอบด้วยวัสดุชนิด n สองชั้นและวัสดุชนิด p หนึ่งชั้น หรือ วัสดุชนิด p สองชั้น และวัสดุชนิด n หนึ่งชั้น ในอดีตเรียกว่า npn ทรานซิสเตอร์ และ pnp ทรานซิสเตอร์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.2 การจัดไบแอสที่เหมาะสมกับทรานซิสเตอร์แต่ละชนิด ถือเป็นสิ่งที่จำเป็นในการสร้างขอบเขตของการทำงานในย่านที่เหมาะสมสำหรับการขยาย ac ชั้นอิมิตเตอร์(Emitter)ถูกโด๊ปมากกว่าส่วนที่เบส(Base)และคอลเล็คเตอร์(Collector)ซึ่งจะถูกโด๊ปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ชั้นรอบนอกมีความกว้างมากกว่าวัสดุประเภท p หรือ n ที่ถูกประกบ สำหรับทรานซิสเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.2 อัตราส่วนของความกว้างทั้งหมดต่อชั้นที่ถูกประกบคือ $0.150\text{ in.} / 0.001\text{ in.} = 150:1$ การโด๊ปของชั้นสารกึ่งตัวนำที่อยู่ตรงกลางซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วยังน้อยกว่าชั้นนอกมาก (โดยทั่วไปคือ 1:10 หรือน้อยกว่า) ระดับการโด๊ปที่ต่ำกว่านี้จะลดการนำไฟฟ้า (เพิ่มความต้านทาน) ของวัสดุประเภทนี้ โดยจำกัดจำนวนตัวพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระสำหรับการไบแอสที่แสดงในรูปที่ 5.2 จุดเชื่อมต่อแทนด้วยตัวพิมพ์ใหญ่ E คืออิมิตเตอร์(Emitter) C คือคอลเล็คเตอร์(Collector)และ B คือเบส(Base)



(ก)



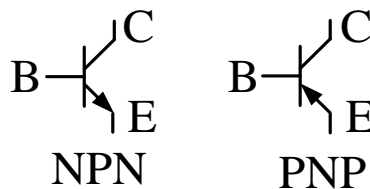
(ข)

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างรูปร่างหน้าตาและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์

(Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky)

5.3 การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์

ตัวอย่างรูปร่างหน้าตาและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 การวิเคราะห์หรือออกแบบการขยายของทรานซิสเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการตอบสนองทั้ง dc และ ac ของระบบ บ่อยครั้งที่มีการสันนิษฐานว่าทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีหัตถ์จรรยาที่สามารถยกระดับอินพุต ac ที่ใช้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือกำลังไฟฟ้าเป็นผลมาจากการถ่ายโอนพลังงานจากอุปกรณ์จ่ายกระแสตรงที่จ่ายให้กับขาของทรานซิสเตอร์ การวิเคราะห์หรือออกแบบเครื่องขยายเสียงอิเล็กทรอนิกส์ใด ๆ จึงมีส่วนประกอบสองส่วนคือส่วน dc และส่วน ac และที่สำคัญการใช้ทฤษฎีบทการทับซ้อนสามารถใช้ตรวจสอบ เงื่อนไขของ dc โดยสามารถแยกการตอบสนอง ac ออกจากกันโดยสิ้นเชิง



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างรูปร่างหน้าตาและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์
ที่มา: <https://learn.adafruit.com/transistors-101>

อย่างไรก็ตามพึงระลึกไว้เสมอว่าในระหว่างขั้นตอนการออกแบบหรือการวิเคราะห์เลือกพารามิเตอร์สำหรับระดับ dc จะส่งผลต่อการตอบสนองของ ac ด้วยและในทางกลับกัน ระดับ dc ของการทำงานของทรานซิสเตอร์ถูกควบคุมโดยปัจจัยหลายอย่างรวมถึงช่วงของจุดปฏิบัติการ(Operating point) ที่เป็นไปได้ คุณลักษณะของอุปกรณ์ตามคู่มือการใช้งาน ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการจัดไบแอสทรานซิสเตอร์แบบต่างๆทั้งชนิด NPN และ ชนิด PNP นอกจากนี้แล้วในเนื้อหาจะมีการอธิบายช่วงสำหรับการขยายของทรานซิสเตอร์ขั้วต่อสองขั้ว (BJT) เมื่อกำหนดระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแล้วจะต้องสร้างวงจรที่จะสร้างจุดปฏิบัติการ (Operating point) ที่ต้องการ เนื่องจากทรานซิสเตอร์ที่นิยมใช้งานในปัจจุบันเป็นชนิดซิลิกอนและโครงสร้างของขา B และขา E เปรียบเสมือนกับไดโอดดังนั้นเราจึงอนุมานได้ว่าแรงดันที่ขา B และ E มีค่าดังสมการที่ 5.1 และสามารถคำนวณหาค่ากระแสที่ขา E และขา C ได้จากสมการที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

$$V_{BE} \cong 0.7V \quad (5.1)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad (5.2)$$

$$I_C \cong I_E \quad (5.3)$$

5.3.1 คุณสมบัติและจุดทำงานต่างๆของทรานซิสเตอร์

จุดทำงานของทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้ไป 3 ย่านด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4

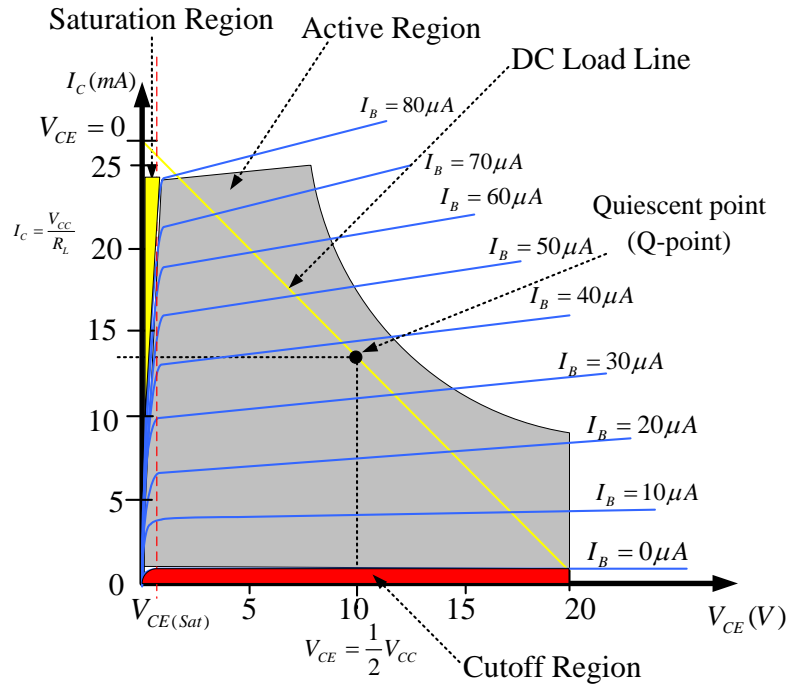
1. ย่านคัทออฟ (Cutoff region)การทำงานในย่านคัทออฟนี้กระแสเบสไม่ไหล ($I_B = 0$) ส่งผลให้กระแสคอลเล็กเตอร์ไม่ไหลดังแสดงในกรอบสีแดง
2. ย่านอิ่มตัว (Saturation region)

การทำงานในย่านอิ่มตัวนี้ กระแสคอลเล็กเตอร์นั้นไหลแบบเชิงเส้น เพียงเพิ่มแรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) เล็กน้อย ซึ่งลักษณะการทำงานแบบนี้จึงเหมาะที่นำไปประยุกต์ใช้เป็น สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในกรอบสีเหลือง

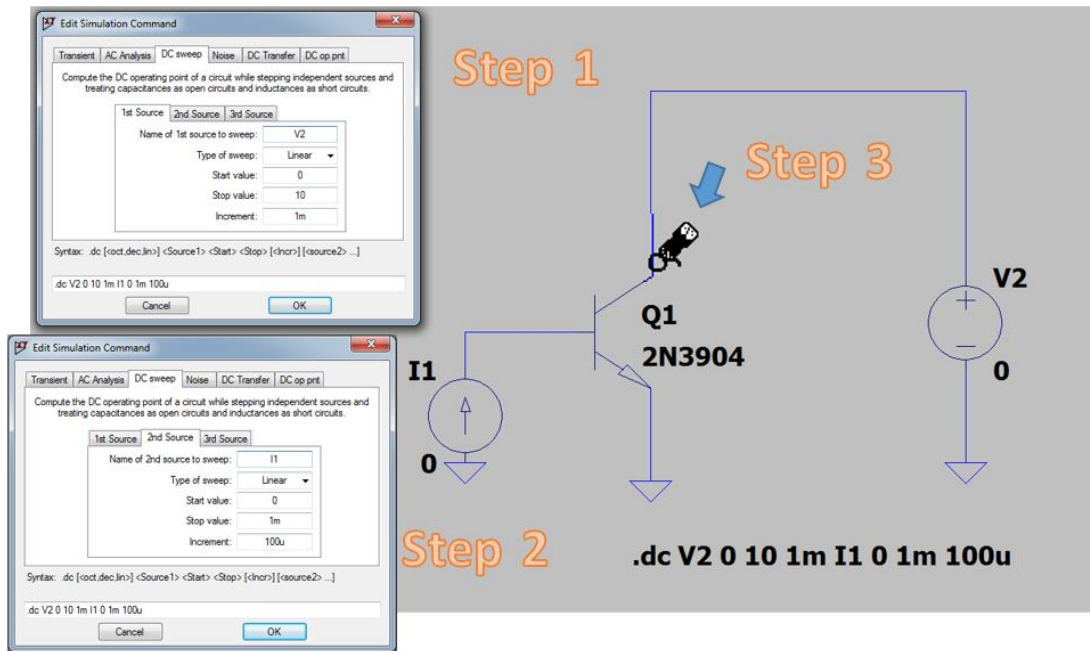
3. ย่านแอ็คทีฟ (Active region)

การทำงานในย่านแอ็คทีฟนี้กระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ถึงแม้จะเพิ่มแรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) มากขึ้น ดังรูปที่ 5.4 (กรอบสีเทา) ในย่านการทำงานนี้แรงดันตกคร่อมเบส-อิมิตเตอร์ (V_{BE}) มีค่า = 0.7 V จากการไหลของกระแสคอลเล็กเตอร์ที่ค่อนข้างคงที่ถึงแม้แรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การทำงานในย่านแอ็คทีฟ จึงนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรรขยายสัญญาณ

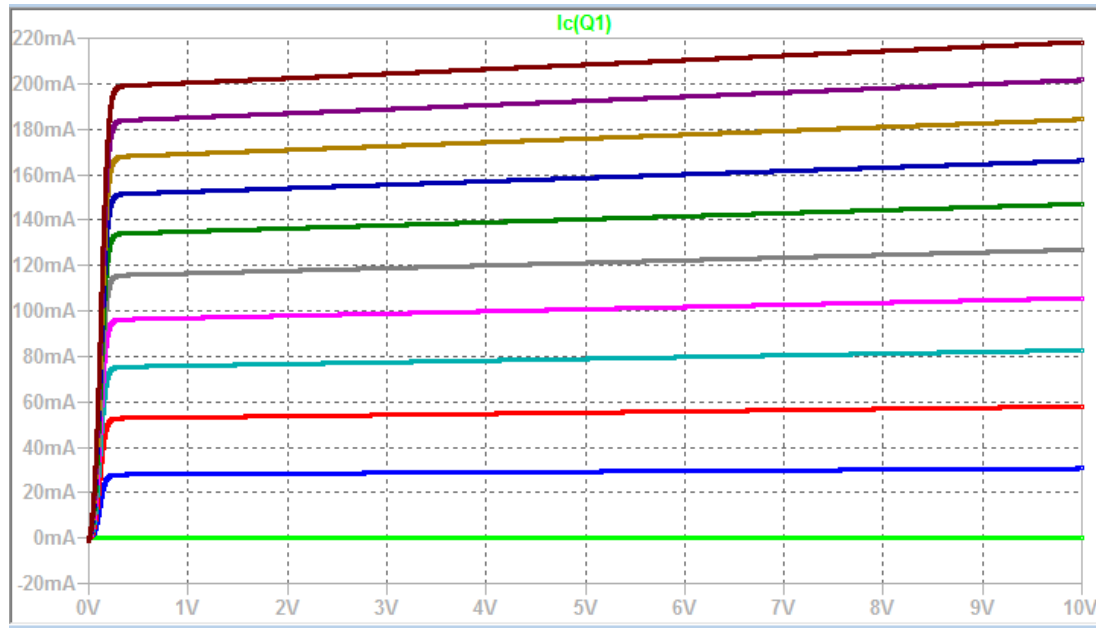
รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างการหาค่าคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 ด้วย LTspice



รูปที่ 5.4 เส้นกราฟคุณลักษณะแสดงจุดทำงานต่างๆของทรานซิสเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 ด้วย LTspice (ก)วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข) เส้นกราฟคุณลักษณะ

5.3.2 การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์แบบคงที่ (Fixed-bias circuit)

รูปที่ 5.5 แสดงวงจรไบแอสคงที่ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ตัวต้านทาน R_{BB} ทำหน้าที่กำหนดกระแส I_B ที่ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R_C ทำหน้าที่กำหนดแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ แรงดันไบแอสที่ขาเบส V_{BB} แรงดันไฟเลี้ยง V_{CC} เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาเบสไปยังขาอิมิตเตอร์ได้ดังสมการที่ 5.4(ก) โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.5(ซ้าย) ได้ดังต่อไปนี้ $V_{BE} = 0.7V$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (5.4ก)$$

หรือเราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาเบสไปยังขาอิมิตเตอร์ได้ดังสมการที่ 5.4(ข) โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.5(ขวา)

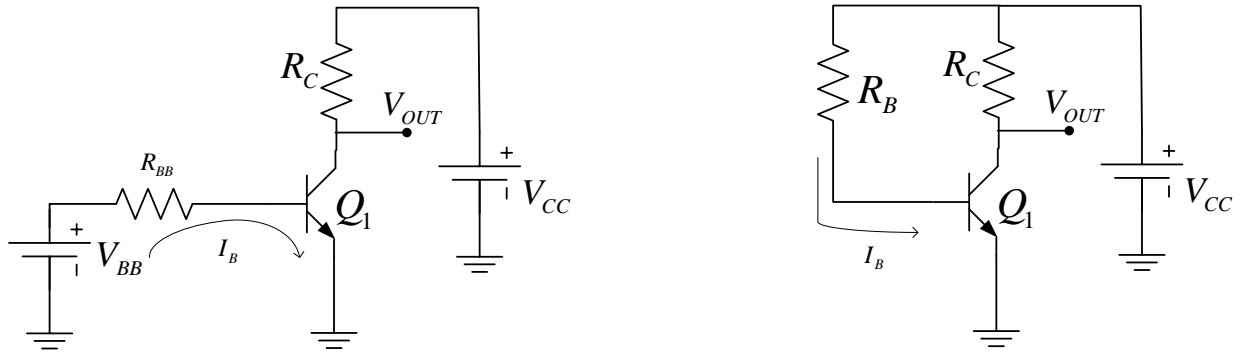
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (5.4ข)$$

และค่ากระแสที่ไหลผ่านจากขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์

$$I_C = \beta I_B \quad (5.5)$$

และแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์คือ

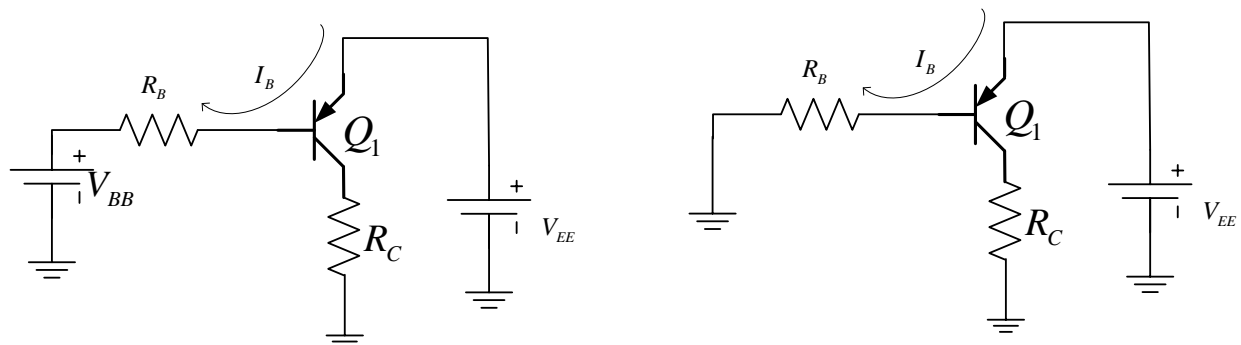
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.5 การจัดไบแอสแบบคงที่ให้กับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

ตัวอย่างที่ 5.1 จากรูปที่ 5.5 (ขวา)จงคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังในตารางเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้ $R_B = 50k\Omega$, $R_C = 100\Omega$, $V_{CC} = 5V$, $\beta = 100$

พารามิเตอร์	คำนวณ
$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$	$86 \mu A$
$I_C = \beta I_B$	$8.6 mA$
$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	$4.14 V$



รูปที่ 5.6 การจัดไบแอสแบบคงที่ให้กับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

รูปที่ 5.6 แสดงการจัดไบแอสแบบคงที่ให้กับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ไปยังขาเบสได้ดังสมการที่ 5.7 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.6(ซ้าย) ได้ดังต่อไปนี้ $V_{EB} = 0.7V$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB} - V_{BB}}{R_B} \quad (5.7)$$

และเราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ไปยังขาเบสได้ดังสมการที่ 5.8 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.6(ขวา) ได้ดังต่อไปนี้

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB}}{R_B} \quad (5.8)$$

และค่ากระแสที่ไหลผ่านจากขาไปยังขาคอลเล็กเตอร์

$$I_C = \beta I_B \quad (5.9)$$

และแรงดันระหว่างขาอิมิตเตอร์และขาคอลเล็กเตอร์คือ

$$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C \quad (5.10)$$

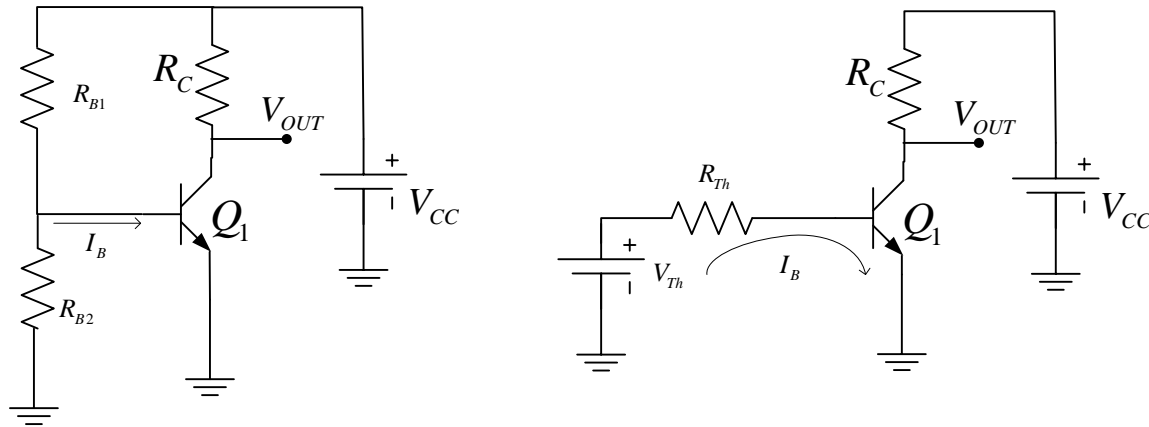
ตัวอย่างที่ 5.2 จากรูปที่ 5.6 (ซ้าย)จงคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังในตารางเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้ $R_B = 100k\Omega$, $V_{BB} = 2.5V$, $R_C = 200\Omega$, $V_{EE} = 8V$, $\beta = 100$

พารามิเตอร์	คำนวณ
$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB} - V_{BB}}{R_B}$	$48 \mu A$
$I_C = \beta I_B$	$4.8 mA$
$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C$	$7.04 V$

5.3.3 การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์แบบแบ่งแรงดัน (Voltage-divider bias circuit)

รูปที่ 5.7 แสดงวงจรไบอัสคงที่ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ตัวต้านทาน R_{B1} และ R_{B2} ทำหน้าที่แบ่งแรงดันและกำหนดกระแส I_B ที่ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R_C ทำหน้าที่กำหนด

แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์



รูปที่ 5.7 การจัดไบแอสแบบแบ่งแรงดันให้กับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

แรงดันไบแอสที่ขาเบส V_{Th} ได้มาจากการแบ่งแรงดันของ R_{B1} และ R_{B2} ด้วยวงจร Voltage divider สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.12 แรงดันไฟเลี้ยง V_{CC}

$$R_{Th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (5.11)$$

$$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC} \quad (5.12)$$

เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาเบสไปยังขาอิมิตเตอร์ได้ดังสมการที่ 5.13 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.7(ขวา) ได้ดังต่อไปนี้ $V_{BE} = 0.7V$

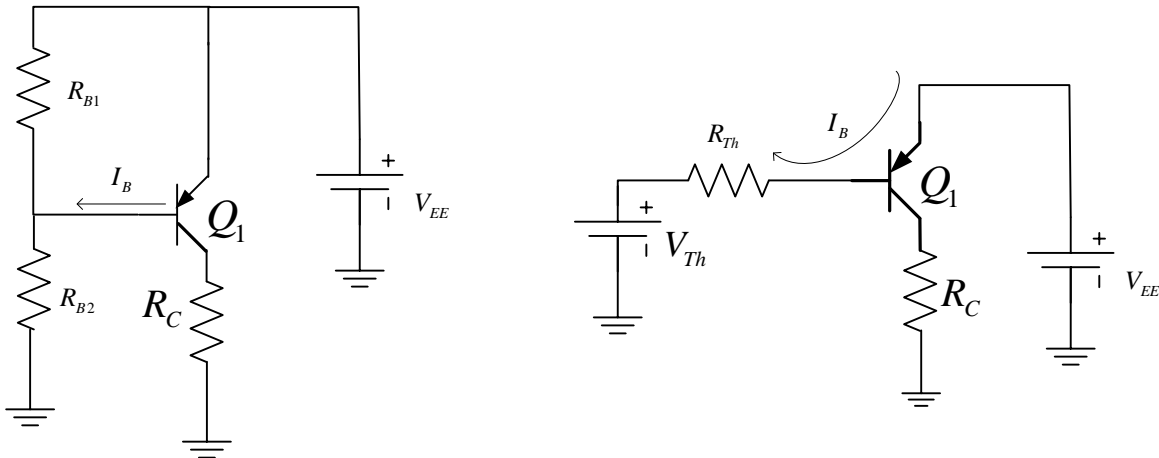
$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \quad (5.13)$$

และค่ากระแสที่ไหลผ่านจากขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์

$$I_C = \beta I_B \quad (5.14)$$

และแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์คือ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (5.14)$$



รูปที่ 5.8 การจัดไบแอสแบบแบ่งแรงดันให้กับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

รูปที่ 5.8 แสดงวงจรไบแอสคงที่ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ตัวต้านทาน R_{B1} และ R_{B2} ทำหน้าที่แบ่งแรงดันและกำหนดกระแส I_B ที่ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R_C ทำหน้าที่กำหนดแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ แรงดันไบแอสที่ขาเบส V_{Th} ได้มาจากการแบ่งแรงดันของ R_{B1} และ R_{B2} ด้วยวงจร Voltage divider สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.16 แรงดันไฟเลี้ยงคือ V_{EE}

$$R_{Th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (5.15)$$

$$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{EE} \quad (5.16)$$

เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านขาเบสไปยังขาอิมิตเตอร์ได้ดังสมการที่ 5.17 โดยอ้างอิงจากรูปที่ 5.5(ขวา) ได้ดังต่อไปนี้ $V_{EB} = 0.7V$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{Th} - V_{EB}}{R_{Th}} \quad (5.17)$$

และค่ากระแสที่ไหลผ่านจากขาคอลเล็กเตอร์

$$I_C = \beta I_B \quad (5.18)$$

และแรงดันระหว่างขาอิมิตเตอร์และขาคอลเล็กเตอร์คือ

$$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C \quad (5.19)$$

เอกสารอ้างอิง

1. <https://www.youtube.com/watch?v=KfouUzORqk>
2. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
3. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.
4. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/11551/ONSEMI/BC547.html>
5. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15077/PHILIPS/2N3904.html>
6. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1093983/ISC/2N3906.html>

ใบงานที่ 5. ทรานซิสเตอร์

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์
- 1.2 เพื่อศึกษาการไบแอสทรานซิสเตอร์
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ และสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904
4. ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3906
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
6. แอมป์มิเตอร์ 2 ตัว
7. โวลต์มิเตอร์
8. ออสซิลโลสโคป
9. ตัวต้านทาน $100\text{ k}\Omega$, $75\text{ k}\Omega$, $50\text{ k}\Omega$, 100Ω

การทดลองที่ 5.1 การทดลองหาค่าลักษณะโดยใช้โปรแกรม LTspice เปรียบเทียบกับการทดลองจริง

วิธีการทดลอง

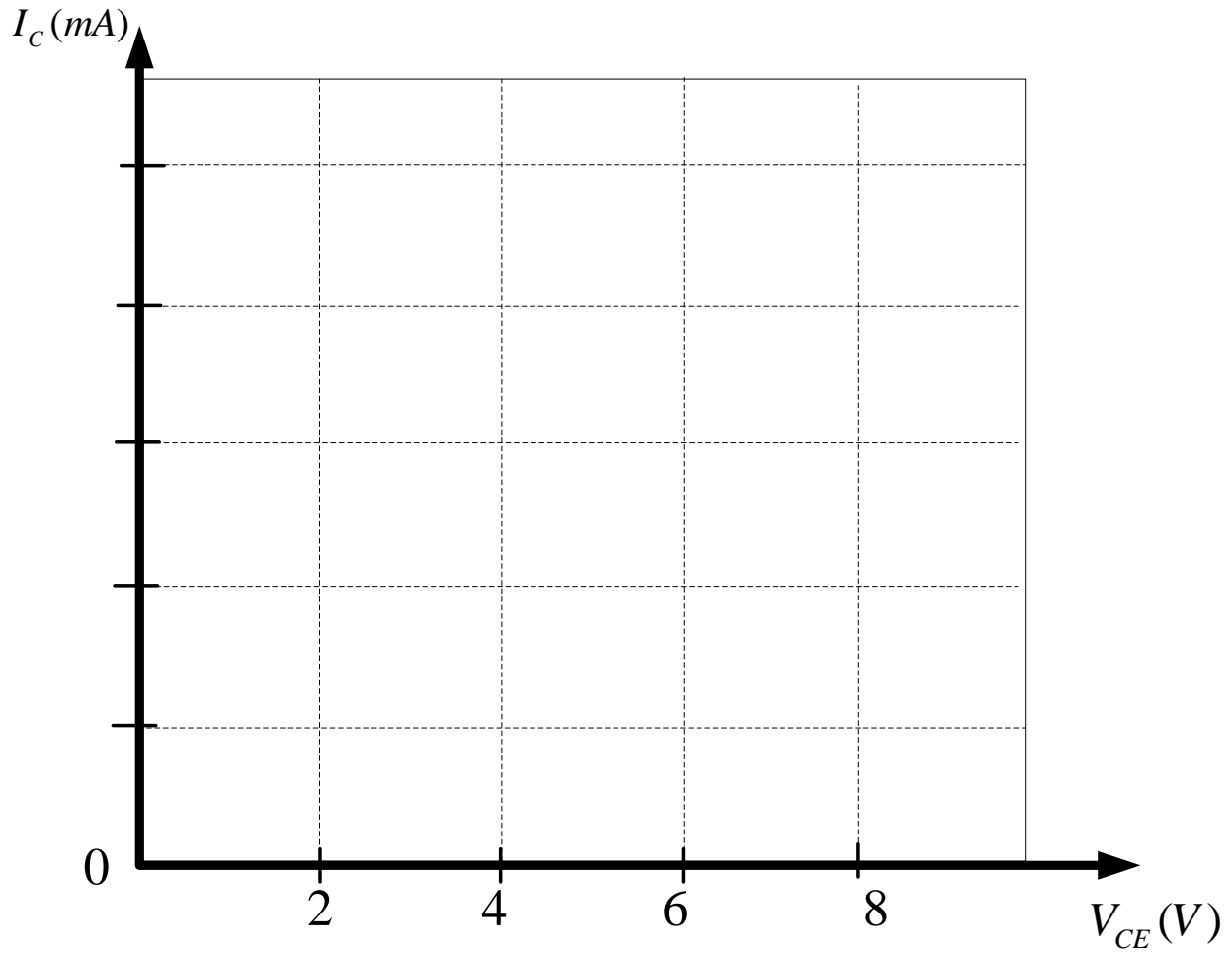
5.1.1 ตัวอย่างการทดลองดังภาพ ในโปรแกรม LTspice โดยกำหนดค่าต่างๆดังนี้ ใช้ Current source ต่อเข้าขา B และใช้แหล่งจ่ายไฟต่อเข้าขา C ลงกราวด์ จากนั้นใช้ DC Sweep เพื่อปรับกระแสและแรงดันตั้ง Step ตามรูป และพล็อตกราฟแรงดัน V_{CE} เทียบกับกระแส I_C ในแต่ละค่าของ I_B ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.5 (ข) ลงในรูปที่ 5.10

The image displays the configuration for a DC sweep simulation in LTspice. It features two dialog boxes for setting sweep parameters and a circuit diagram with three steps highlighted:

- Step 1:** The 'Edit Simulation Command' dialog is set to 'DC sweep' with '1st Source' as 'V2', 'Type of sweep' as 'Linear', 'Start value' as '0', 'Stop value' as '8', and 'Increment' as '1m'.
- Step 2:** The 'Edit Simulation Command' dialog is set to 'DC sweep' with '2nd Source' as 'I1', 'Type of sweep' as 'Linear', 'Start value' as '0', 'Stop value' as '80u', and 'Increment' as '20u'.
- Step 3:** The final simulation command entered is `.dc V2 0 8 1m I1 0 80u 20u`.

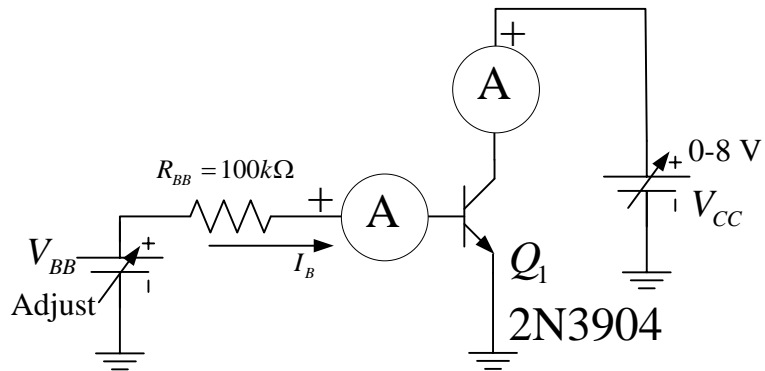
The circuit diagram shows a 2N3904 transistor (Q1) with a current source I1 connected to its base and a voltage source V2 connected to its collector. The emitter is grounded.

รูปที่ 5.9 วงจรใน LTspice ที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

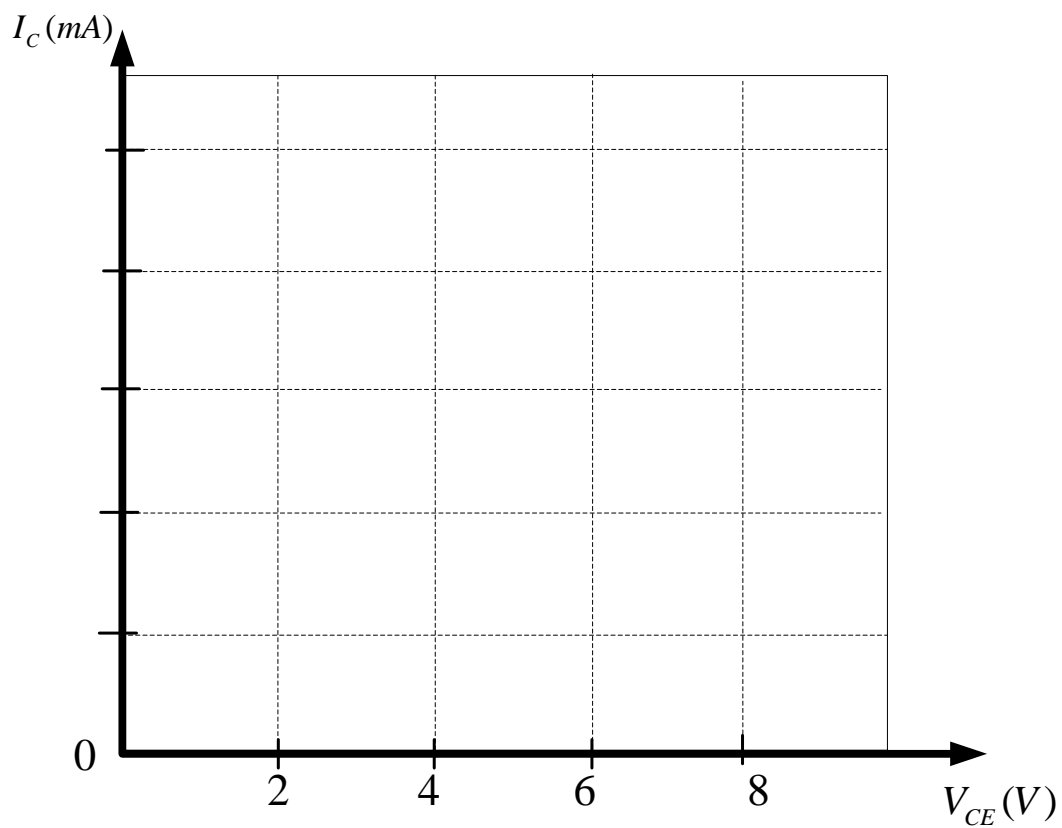
5.1.2 ทำการต่อวงจรจริงพร้อมกับวัดค่าต่างๆ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 5.11 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

Vce	Ic(Ib=0uA)	Ic(Ib=20uA)	Ic(Ib=40uA)	Ic(Ib=60uA)	Ic(Ib=80uA)
0					
0.2					
0.4					
0.6					
0.8					
1					
2					
4					
6					
8					

ตารางที่ 1



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

สรุปผลการทดลอง

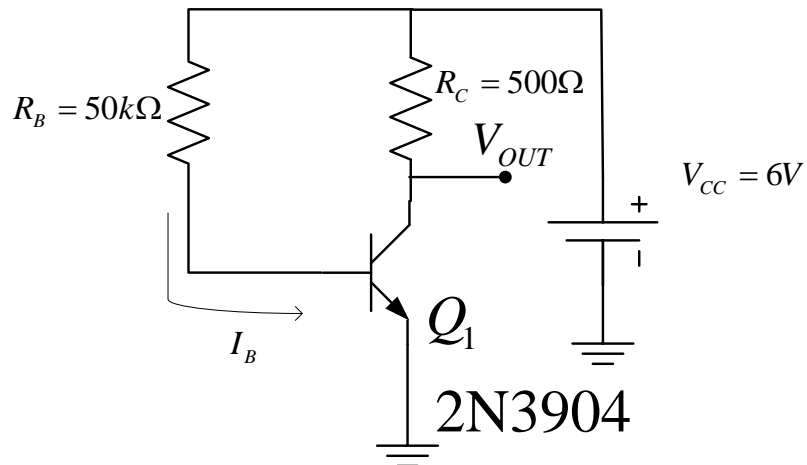
.....

.....

.....

การทดลองที่ 5.2 การทดลองวงจรไบแอสคงที่ของทรานซิสเตอร์แบบ NPN

จากวงจรที่ 5.13 จงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Datasheet ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 โดยใช้ค่า $\beta = 100$



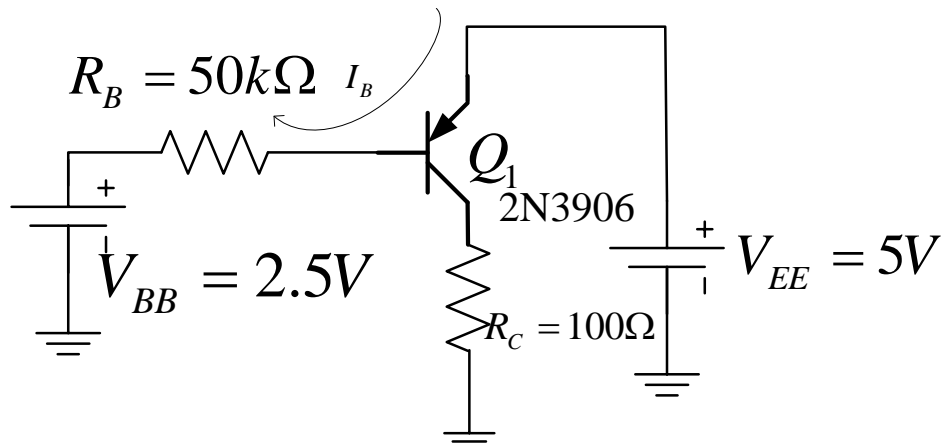
รูปที่ 5.13 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$			
$I_C = \beta I_B$			
$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$			

สรุปผลการทดลอง

การทดลองที่ 5.3 การทดลองวงจรไบแอสคงที่ของทรานซิสเตอร์แบบ PNP

จากวงจรที่ 5.14 จงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Datasheet ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3906



รูปที่ 5.14 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB} - V_{BB}}{R_B}$			
$I_C = \beta I_B$			
$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C$			

สรุปผลการทดลอง

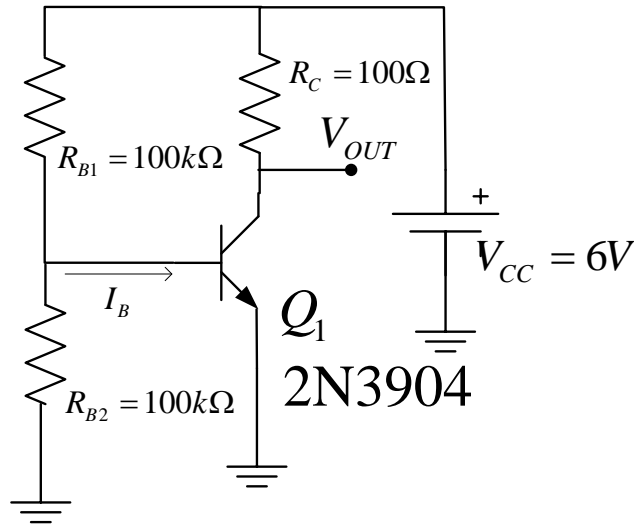
.....

.....

.....

การทดลองที่ 5.4 การทดลองวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันของทรานซิสเตอร์แบบ NPN

จากวงจรที่ 5.15 จงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Datasheet ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904



รูปที่ 5.15 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$		✘	✘
$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$			
$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}}$			
$I_C = \beta I_B$			
$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$			

สรุปผลการทดลอง

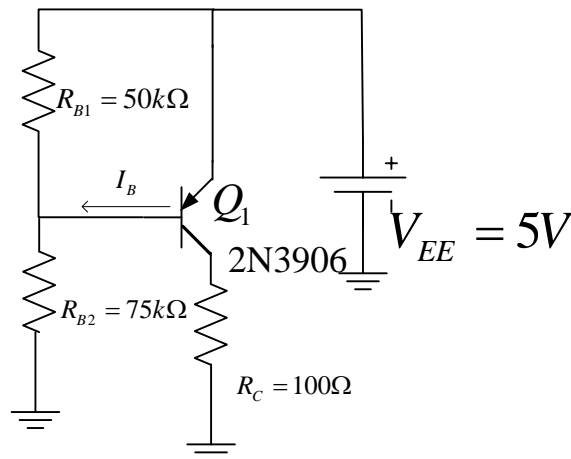
.....

.....

.....

การทดลองที่ 5.5 การทดลองวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันของทรานซิสเตอร์แบบ PNP

จากวงจรที่ 5.16 จงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Datasheet ของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3906



รูปที่ 5.16 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$		✘	✘
$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{EE}$			
$I_B = \frac{V_{Th} - V_{EB}}{R_{Th}}$			
$I_C = \beta I_B$			
$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C$			

สรุปผลการทดลอง

.....

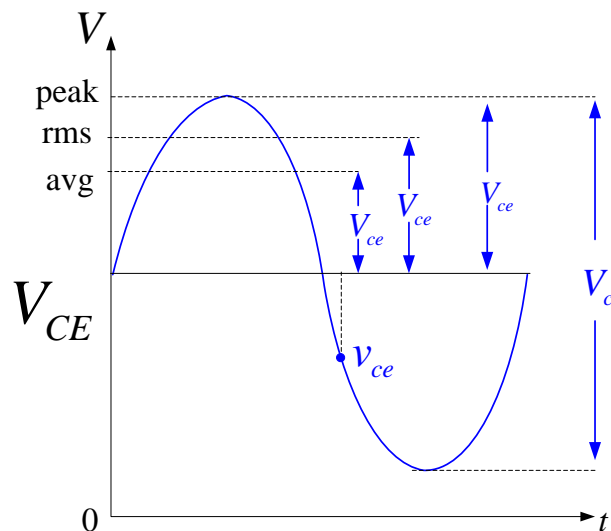
.....

.....

บทที่ 6 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์

6.1 การขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์(BJT)

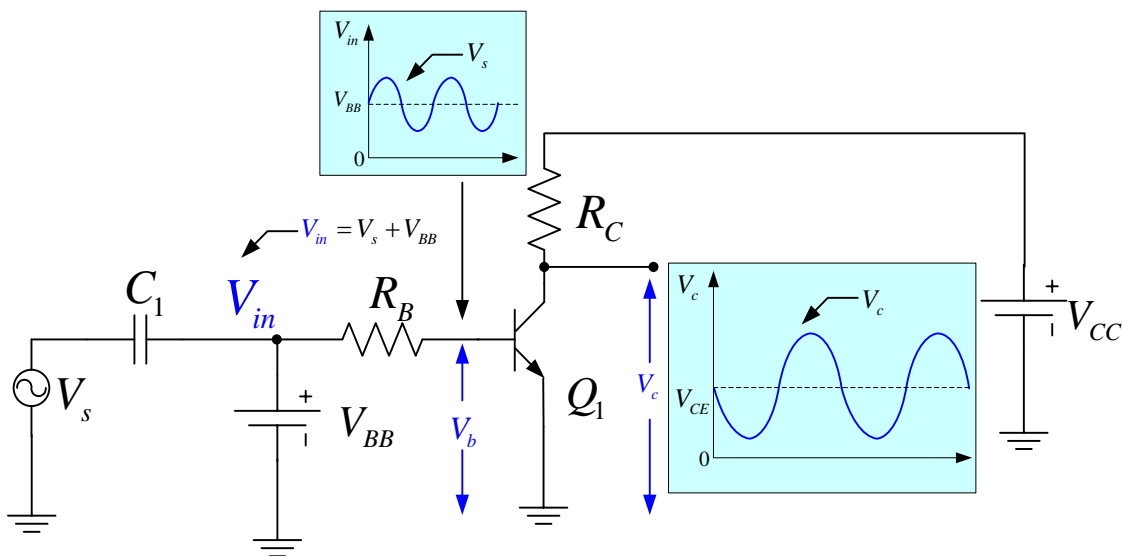
ก่อนที่จะพูดถึงแนวคิดของการขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์นั้นจะต้องมีการอธิบายการกำหนดสัญลักษณ์ที่เราจะใช้สำหรับปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงความต้านทานของวงจรเนื่องจากวงจรมีทั้งปริมาณที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง dc และไฟฟ้ากระแสสลับ ac รวมกันอยู่ ในบทนี้ตัวพิมพ์ใหญ่ตัวเอียงใช้สำหรับทั้งกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ข้อกำหนดนี้ใช้กับค่า rms, ค่า average ค่า peak และค่า peak-to-peak ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าสลับเป็น rms เสมอเว้นแต่จะระบุไว้เป็นอย่างอื่น แม้ว่าหนังสือหรือ Text book บางเล่มจะใช้ตัวพิมพ์เล็ก i และ v สำหรับกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ในเอกสารนี้จะใช้ตัวพิมพ์เล็ก i และ v สำหรับค่าชั่วขณะเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในหัวข้อนี้คือ ความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้า dc หรือแรงดันและกระแส ac หรือแรงดันไฟฟ้าอยู่ในตัวห้อย ปริมาณ dc จะมีตัวห้อยโรมัน (nonitalic) ตัวพิมพ์ใหญ่เสมอ ตัวอย่างเช่น I_B , I_C และ I_E คือกระแส dc ของทรานซิสเตอร์ที่ขาต่างๆ ส่วน V_{BE} , V_{CB} และ V_{CE} คือแรงดันไฟฟ้า dc จากขั้วทรานซิสเตอร์หนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง แรงดันไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวเช่น V_B , V_C และ V_E เป็นแรงดัน dc จากขั้วทรานซิสเตอร์ถึงกราวด์ ส่วนค่าของปริมาณกระแสสลับ AC และปริมาณที่แปรผันตามเวลาทั้งหมดจะมีตัวห้อยตัวพิมพ์เล็กอยู่เสมอ ตัวอย่างเช่น i_b , i_c และ i_e คือกระแสของทรานซิสเตอร์ ac ส่วน v_{be} , v_{cb} และ v_{ce} คือแรงดันไฟฟ้า ac จากขั้วทรานซิสเตอร์หนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง ส่วน V_b , V_c และ V_e เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากขั้วทรานซิสเตอร์ถึงกราวด์



รูปที่ 6.1 V_{ce} สามารถแทนค่า rms, average, peak หรือ peak-to-peak แต่กำหนดเป็นค่า rms เสมอ

v_{ce} คือค่าชั่วขณะบนเส้นกราฟแรงดัน

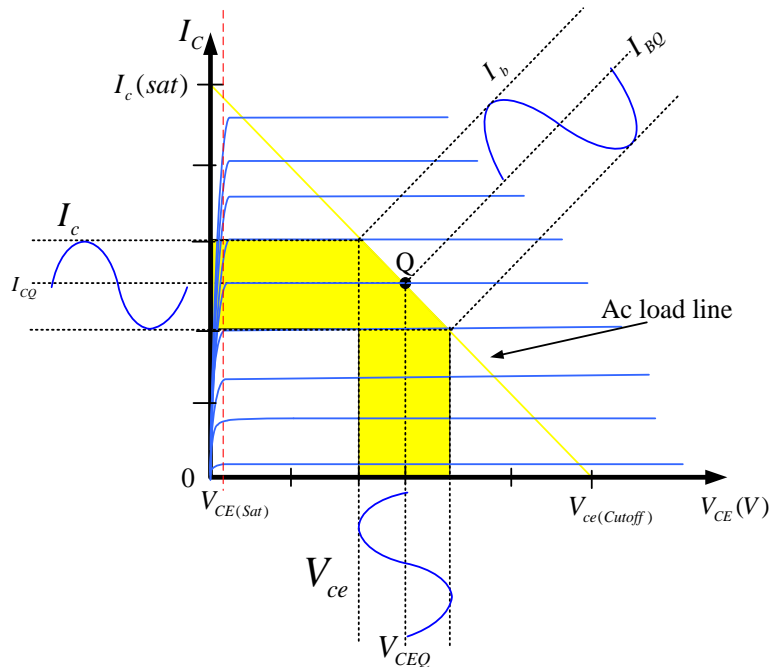
รูปที่ 6.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขา C ไปขา E โดยแทนด้วย V_{ce} ซึ่งสามารถแทนได้ทั้งที่เป็นค่า rms หรือค่า average หรือค่า peak หรือค่า peak-to-peak แต่โดยทั่วไปจะกำหนดให้เป็นค่า rms เสมอ เว้นแต่จะระบุไว้เป็นอย่างอื่น V_{ce} คือค่าชั่วขณะบนเส้นกราฟแรงดัน C ไปขา E นอกจากกระแสและแรงดันไฟฟ้าแล้ว ความต้านทานมักจะมีค่าที่แตกต่างกันเมื่อวิเคราะห์วงจรกระแสสลับ ac ซึ่งตรงข้ามกับการวิเคราะห์ dc ตัวพิมพ์เล็ก ตัวห้อยใช้เพื่อระบุค่าความต้านทานกระแสสลับ เช่น R_c (ตัวห้อย c ตัวเล็ก) คือความต้านทานภายในของชาคอลเล็กเตอร์ที่วิเคราะห์ในแบบของไฟฟ้ากระแสสลับ ac แต่ R_C (ตัวห้อย C ตัวใหญ่) คือความต้านทานภายในชาคอลเล็กเตอร์ที่วิเคราะห์ในแบบของไฟฟ้ากระแสตรง dc ค่าความต้านทานภายในทรานซิสเตอร์ใช้ตัวพิมพ์เล็ก r' หมายถึงค่าความต้านทานกระแสสลับภายในทรานซิสเตอร์ยกตัวอย่าง เช่น r'_e คือความต้านทานภายในชาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง รูปที่ 6.2 แสดงวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ใช้การไบแอสคงที่โดยมีแรงดัน V_{BE} ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับขา B โดยมีตัวต้านทาน R_B ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลผ่านขาเบส I_B ตัวเก็บประจุ C_1 ทำหน้าที่กั้นแรงดันไฟฟ้าตรงออกจากแหล่งจ่ายสัญญาณอินพุต V_s ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่นไซน์ (ไฟสลับ) และเมื่อรวมกันกับแรงดันไบแอสไฟตรงกับขาเบสทำให้แรงดันมีการยกระดับขึ้นไป ซึ่งแทนด้วยแรงดัน V_{in} การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์เนื่องจากค่าอัตราขยายกระแส จากปรากฏการณ์นี้ ทำให้แรงดันระหว่างชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์ลดลง



รูปที่ 6.2 แสดงวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

ค่ากระแสที่ชาคอลเล็กเตอร์เปลี่ยนแปลงสูงหรือต่ำบนตำแหน่ง Q (Q-Point) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ I_{CQ} และมีเฟสเดียวกันกับกระแสเบส ณ ตำแหน่ง Q (Q-Point) และแรงดันระหว่างชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์ V_{CEQ} เปลี่ยนแปลงสูงหรือต่ำบนตำแหน่ง Q (Q-Point) โดยมีเฟสต่างกัน 180° กับเฟสของแรงดันที่ขา

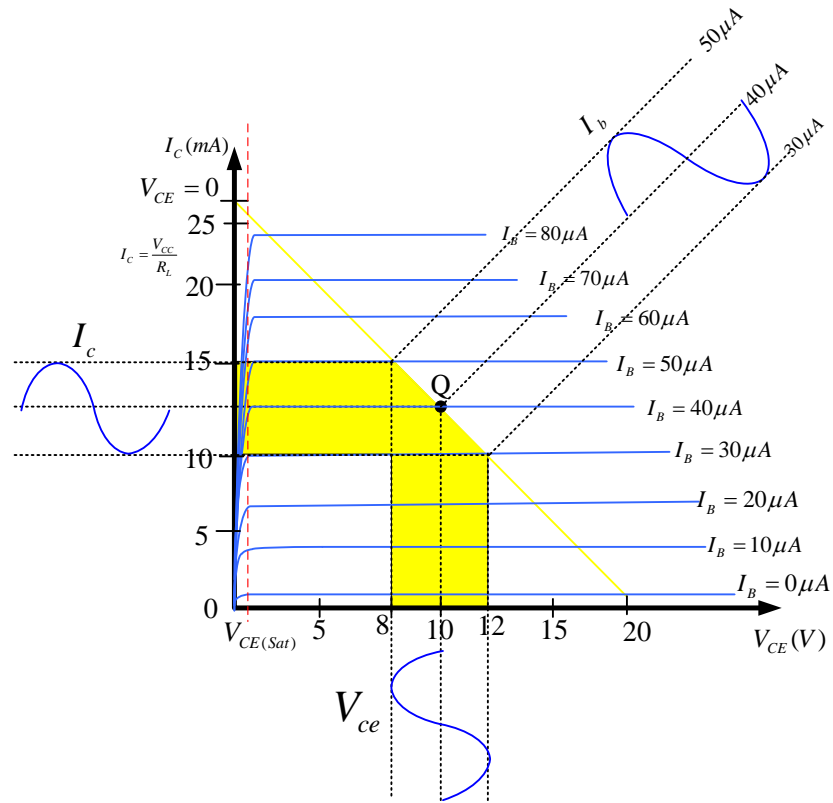
เบสเส้น ac load line ค่อนข้างแตกต่างจากเส้น dc load line เนื่องจากผลกระทบจากผลของค่าความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์ซึ่งเกิดจาก R_L ขนานกับ R_C ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่มีเฉพาะ R_C เดี่ยวๆ



รูปที่ 6.3 ac load line แสดงการทำงานของวงจรขยายแรงดันด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่ง Q (Q-Point)

ตัวอย่างที่ 6.1 จากเส้น ac load line ในรูปที่ 6.4 ขยายสัญญาณอินพุต $\pm 10 \mu A$ ซึ่งอยู่ระหว่างบนและล่างจุดตำแหน่ง Q (Q-Point) ของกระแสเบส $40 \mu A$ จงหาค่า peak-to-peak ของกระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์และแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์

วิธีทำ ให้ลากเส้นตัดลงเพื่อใช้แสดงจุดการทำงานของ กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ ที่แกนตั้งจะทำให้เราได้ค่า I_c peak-to-peak = 2.5 mA ซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่ $I_{CQ} = 12.5 \text{ mA}$ ส่วนแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์ ให้ลากเส้นตัดลงเพื่อใช้แสดงจุดการทำงานของแรงดันที่แกนนอนจะทำให้เราได้ค่า V_{ce} peak-to-peak = 2 V ซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่ $V_{CEQ} = 10 \text{ V}$



รูปที่ 6.4 AC load line แสดงการทำงานของวงจรขยายแรงดันด้วยทรานซิสเตอร์ในตัวอย่างที่ 6.1
6.2 แบบจำลองการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (TRANSISTOR AC MODELS)

พารามิเตอร์ r และ พารามิเตอร์ h

มีพารามิเตอร์ r อยู่ 5 ตัวที่นิยมใช้ในการพิจารณาวจรทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์รวมถึงพารามิเตอร์ h ที่ผู้ผลิตมักจะระบุมาในคู่มืออุปกรณ์ (Datasheet) ดังอธิบายในตารางที่ 6.1 (ส่วนที่แรงเสีฟ้าอ่อน คือ พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจรขยายของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์)

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ r และ พารามิเตอร์ h

ลำดับ	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ที่มา, สมการ
1	h_i	อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance (resistance))	ค่าจาก Datasheet
2	h_r	อัตราส่วนแรงดันป้อนกลับ	ค่าจาก Datasheet

		(Voltage feedback ratio)	
3	h_f	อัตราขยายกระแสไปข้างหน้า (Forward current gain)	ค่าจาก Datasheet
4	h_o	เอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ (Output admittance (conductance))	ค่าจาก Datasheet
5	h_{ie}	อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร Common-Emitter	ค่าจาก Datasheet
6	h_{re}	อัตราส่วนแรงดันป้อนกลับ ของวงจร Common-Emitter	ค่าจาก Datasheet
7	h_{fe}	อัตราขยายกระแสไปข้างหน้า ของวงจร Common-Emitter	ค่าจาก Datasheet
8	h_{oe}	เอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ ของวงจร Common-Emitter	ค่าจาก Datasheet
9	h_{ib}	อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร Common-Base	*ค่าจาก Datasheet
10	h_{rb}	อัตราส่วนแรงดันป้อนกลับ ของวงจร Common-Base	*ค่าจาก Datasheet
11	h_{fb}	อัตราขยายกระแสไปข้างหน้าของวงจร Common-Base	*ค่าจาก Datasheet
12	h_{ob}	เอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ของวงจร Common-Base	*ค่าจาก Datasheet
13	h_{ic}	อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร Common-Collector	*ค่าจาก Datasheet
14	h_{rc}	อัตราส่วนแรงดันป้อนกลับ ของวงจร Common-Collector	*ค่าจาก Datasheet
15	h_{fc}	อัตราขยายกระแสไปข้างหน้า ของวงจร Common-Collector	*ค่าจาก Datasheet
16	h_{oc}	เอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ ของวงจร Common-Collector	*ค่าจาก Datasheet
17	α_{ac}	อัตราขยายแรงดัน ac ในสัดส่วนของกระแสที่ขา คอลเล็กเตอร์ต่อกระแสขาอิมิตเตอร์	$\alpha_{ac} = \frac{I_c}{I_e} \quad (6.1)$ $\alpha_{ac} = h_{fb}$

18	β_{ac}	อัตราขยายแรงดัน ac ในสัดส่วนของกระแสที่ขา คอลเล็กเตอร์ต่อกระแสขาเบส	$\beta_{ac} = \frac{I_c}{I_b} \quad (6.2)$ $\beta_{ac} = h_{fe}$
19	r'_e	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ใน แบบไฟฟ้ากระแสสลับ	$r'_e \cong \frac{25mV}{I_E} \quad (6.3)$ หรือ $r'_e = \frac{h_{re}}{h_{oe}} \quad (6.4)$
20	r'_b	ความต้านทานภายในขาเบสซึ่งวิเคราะห์ในแบบ ไฟฟ้ากระแสสลับ	$r'_b = h_{ie} - \frac{h_{re}}{h_{oe}}(1 + h_{fe}) \quad (6.5)$
21	r'_c	ความต้านทานภายในขาคอลเล็กเตอร์ซึ่ง วิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับ	$r'_c = \frac{h_{re} + 1}{h_{oe}} \quad (6.6)$
22	V_T	แรงดันที่เกิดจากอุณหภูมิซึ่งโดยทั่วไปคิดที่อุณหภูมิ ห้องที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส (The thermal voltage at room temperatures)	$V_T \cong 25mV @ 25^\circ C$
23	g_m	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV} (A/V) \quad (6.7)$

***หมายเหตุ** เนื่องจากคู่มืออุปกรณ์ (Datasheet) ส่วนใหญ่จะให้ข้อมูลมาเฉพาะพารามิเตอร์ h ของ Common-Emitter เท่านั้น ดังนั้นเราอาจจะไม่ค่อยเห็นค่าพารามิเตอร์ h ของวงจร Common-Base และ Common-Collector เช่นตัวอย่างในรูปที่ 6.5

NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

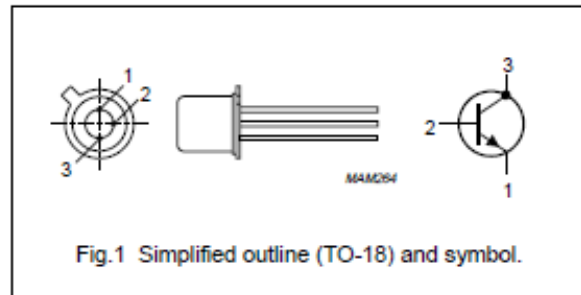
- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.
PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case



QUICK REFERENCE DATA

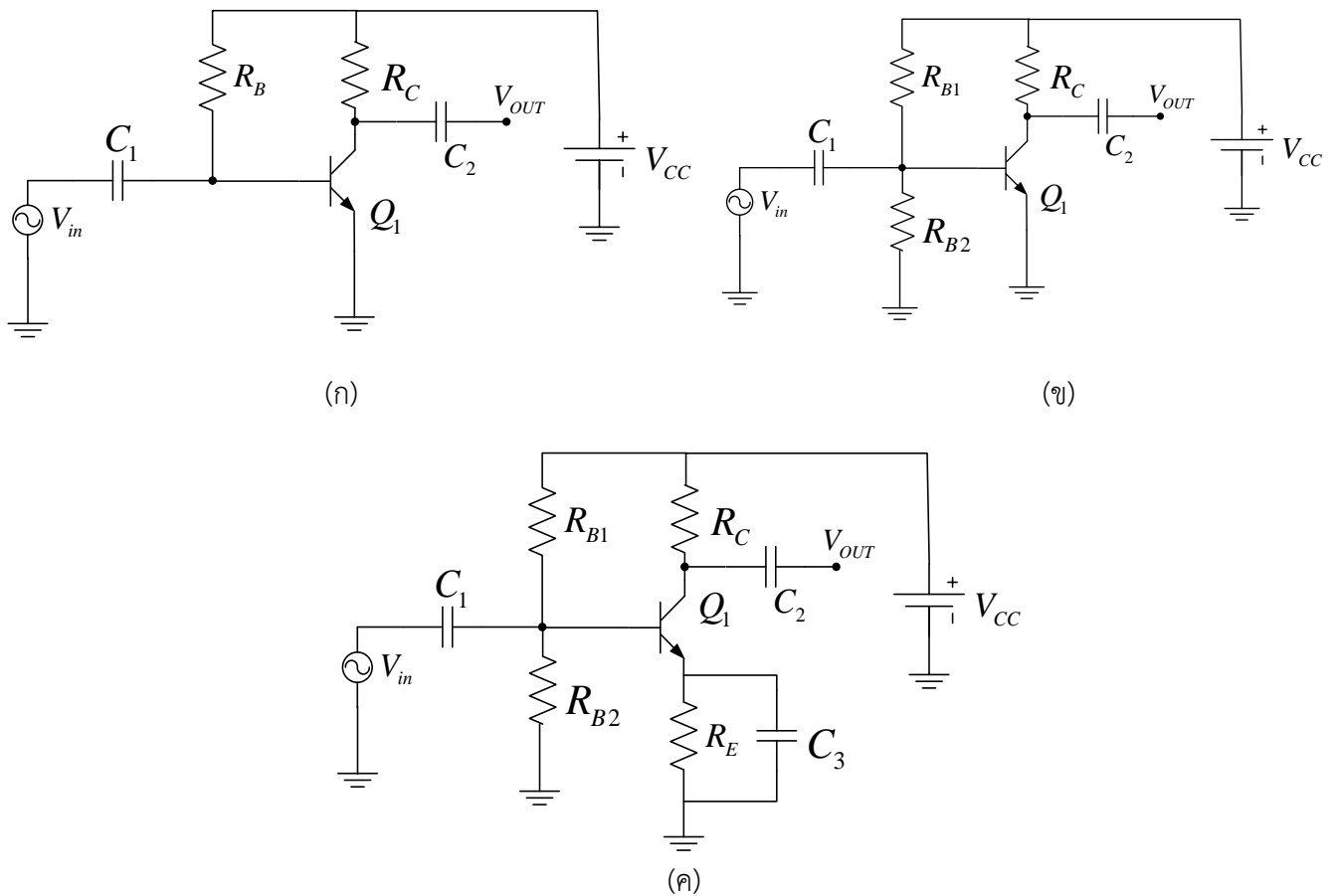
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{CBO}	collector-base voltage	open emitter		60	V
	2N2222		–	75	V
V _{CE0}	collector-emitter voltage	open base		30	V
	2N2222A		–	40	V
I _C	collector current (DC)		–	800	mA
P _{tot}	total power dissipation	T _{amb} ≤ 25 °C	–	500	mW
h _{FE}	DC current gain	I _C = 10 mA; V _{CE} = 10 V	75	–	
f _T	transition frequency	I _C = 20 mA; V _{CE} = 20 V; f = 100 MHz	250	–	MHz
	2N2222A		300	–	MHz
t _{off}	turn-off time	I _{Con} = 150 mA; I _{Bon} = 15 mA; I _{Boff} = –15 mA	–	250	ns

รูปที่ 6.5 ตัวอย่างข้อมูลบางส่วนในคู่มืออุปกรณ์ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222

ที่มา: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15067/PHILIPS/2N2222.html>

6.3 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม (Common-Emitter Amplifier)

รูปที่ 6.6 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม (ก) วงจรไบแอสที่ขาเบสคงที่ (ข) วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ค) วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันที่มี R_E โดยทุกวงจรจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุในภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตเพื่อแยกแรงดันไฟตรงและไฟฟ้ากระแสสลับออกจากกัน



รูปที่ 6.6 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม (ก) วงจรไบแอสที่ขาเบสคงที่ (ข) วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ค) วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันที่มี R_E

อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อนซึ่งอธิบายไว้ในเนื้อหาบทที่ 5 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

วงจร	พารามิเตอร์	คำอธิบาย
ไบแอสคงที่รูปที่ 6.6 (ก)	$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$	กระแสที่ขาเบส dc
ไบแอสแบ่งแรงดันรูปที่ 6.6 (ข)	$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส
ไบแอสแบ่งแรงดันรูปที่ 6.6 (ข)	$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเบส dc
ไบแอสแบ่งแรงดันรูปที่ 6.6 (ข)	$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}}$	กระแสที่ขาเบส dc
ไบแอสแบ่งแรงดันที่มี R_E รูปที่ 6.6 (ค)	$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E}$	กระแสที่ขาเบส dc
ใช้ได้ทั้งไบแอสคงที่และไบแอสแบ่งแรงดัน รวมทั้งวงจรที่มี R_E รูปที่ 6.6 (ก),(ข),(ค)	$I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ dc
ใช้ได้ทั้งไบแอสคงที่และไบแอสแบ่งแรงดัน รูปที่ 6.6 (ก),(ข)	$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์
ไบแอสแบ่งแรงดันที่มีรูปที่ 6.6 (ค)	$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.8 โดยสามารถหาได้จากสมการที่

6.7(ตารางที่ 6.1)
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m (r_o \parallel R_C) \tag{6.8}$$

สมมติให้ $r_o = \infty$ ดังนั้นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจึงพิจารณาได้ดังนี้

$$A_v \cong -g_m R_C \tag{6.9ก}$$

อัตราขยายกระแส A_i สามารถคำนวณได้จาก

$$A_i = \frac{I_c}{I_{in}} = \frac{I_e}{(V_{in} / R_{in(total)})} \quad (6.9ข)$$

ค่าความต้านทานทางด้านขาเบส

$$r_{in(base)} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \beta_{ac} r'_e \quad (6.10)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสคงที่ รูปที่ 6.6 (ก) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_B \quad (6.11)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสแบ่งแรงดัน รูปที่ 6.6 (ข)และ(ค) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2} \quad (6.12ก)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต

กรณีไม่มี R_L

$$r_{out} = R_C \quad (6.12ข)$$

กรณีมี R_L

$$r_{out} = R_C \parallel R_L \quad (6.12ค)$$

การเลือกตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง

ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 เวลาวิเคราะห์ในการทำงานการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแทนที่ด้วยการลัดวงจรที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากการเลือกค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้เพื่อทำให้ X_C มีค่าเล็กน้อยที่ความถี่สัญญาณและถือได้ว่า X_C มีค่าเป็นศูนย์โอห์ม การเลือกตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง C_1 , C_2 เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณความถี่เสียงส่วนใหญ่เป็นแบบ High Pass Filter ดังนั้นจึงมองความถี่ต่ำที่สุดที่อยู่ในย่านความถี่เสียง (ประมาณ 20 Hz) โดยเราเรียกความถี่นี้ว่าเป็นความถี่คัทออฟ f_c โดยตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง C_1 สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

หาค่าคงที่ทางเวลาโดยใช้สูตรดังนี้

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (6.13)$$

ตัวเก็บประจุคัปปลิ่งด้านขาเข้า C_1 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}} \quad (6.14)$$

ตัวเก็บประจุคัปปลิ่งด้านขาออก C_2 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$C_2 = \frac{\tau}{R_C + R_L} \quad (6.15)$$

แต่อย่างไรก็ตามผลของ Emitter Bypass Capacitor ต่อแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาอิมิตเตอร์ C_3 รูปที่ 6.6 (ค) ให้สัญญาณ ac ลัดวงจรจากขาอิมิตเตอร์สู่กราวด์ ค่าของตัวเก็บประจุบายพาสต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงความถี่ของวงจรมีขนาดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (โดยในอุดมคติเท่ากับ 0Ω) เมื่อเทียบกับ R_E ดังนั้นการเลือกค่ารีแอกแตนซ์แบบ capacitive X_C ของตัวเก็บประจุบายพาส ควรน้อยกว่า R_E อย่างน้อย 10 เท่าที่ความถี่ต่ำสุดที่วงจรมีต้องทำงาน

$$10X_C \leq R_E \quad (6.16)$$

จากวงจรรูปที่ 6.6 (ค) ค่าตัวเก็บประจุบายพาสสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$X_{C_3} = \frac{R_E}{10} \quad (6.17)$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f X_{C_3}} \quad (6.18)$$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสพิจารณาได้ดังนี้

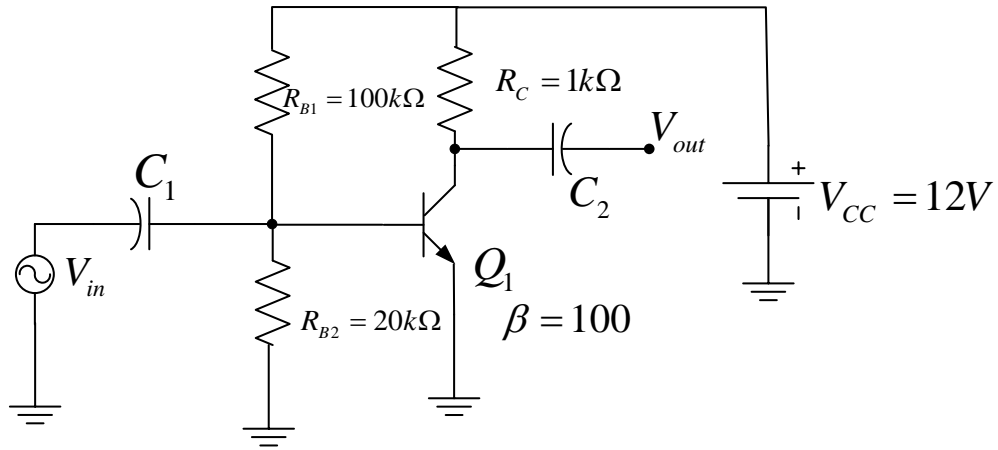
$$A_v \cong \frac{-g_m R_C}{R_E} \quad (6.19)$$

Note ผลกระทบของ R_E กรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสทำให้อัตราขยายทางสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับลดลงนั่นเอง

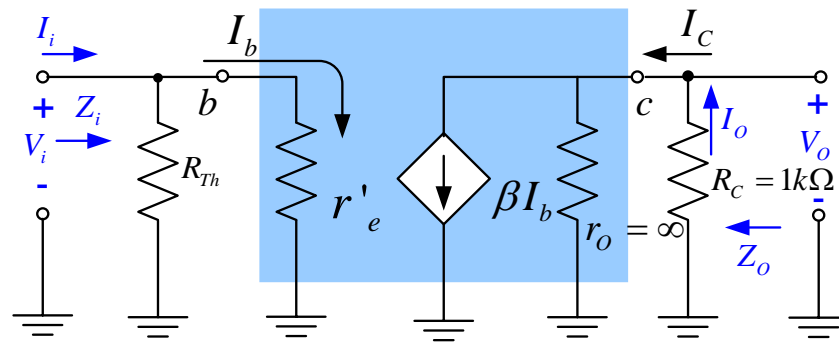
ตัวอย่างที่ 6.2 จากวงจรในรูปที่ 6.7 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ $r_{in(total)}$
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ r_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2
5. จงวาดกราฟ DC load line และหาจุด Q-Point

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ มีค่า $V_{BE}=0.7V$, $\beta=100$, และ v_{in} ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz



(ก)



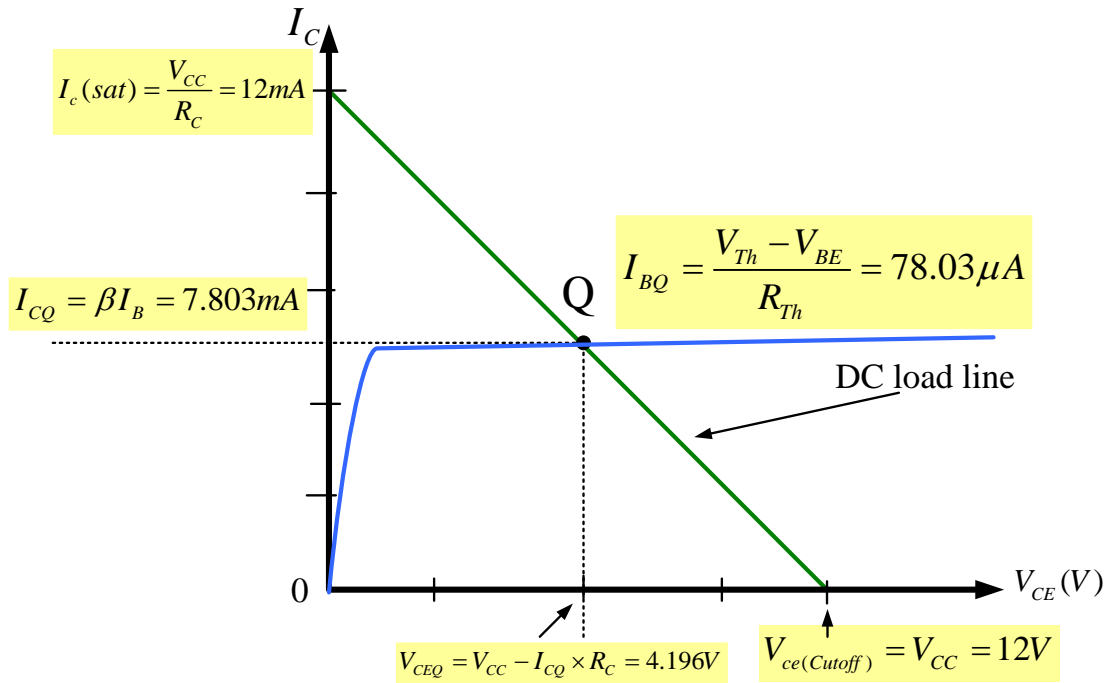
(ข)

รูปที่ 6.7 (ก) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย์

ตารางที่ 6.3 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ของ วงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม

ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1		$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส	16.66 kΩ
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเบส dc	2 V
3		$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}}$	กระแสที่ขาเบส dc	78.03 μA

4	DC	$I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ dc	7.803 mA
5		$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์	4.196 V
6	AC	$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	312 mA/V
7		$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m R_C$	อัตราขยายแรงดัน	-312
8		$r'_e \cong \frac{25mV}{I_E}$ เนื่องจาก $I_E \approx I_C$ ดังนั้น $r'_e \cong \frac{25mV}{I_C}$	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับ	3.203 Ω
9		$r_{in(base)} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \beta_{ac} r'_e$	ค่าความต้านทานเสมือนที่ขาเบส	320.38 Ω
10		$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุต	314.33 Ω
11		$r_{out} = R_C$	ค่าความต้านทานเอาต์พุต	1 k Ω
12		$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคำนวณจากค่าความถี่ที่น้อยที่สุดในโจทย์ใช้ 20Hz	0.00795 s
13		$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}}$ เนื่องจาก $R_S = 0$ ดังนั้น $C_1 = \frac{\tau}{r_{in(total)}}$	ตัวเก็บประจุคานขาเข้า	25.29 μF
14		$C_2 = \frac{\tau}{R_C + R_L}$ เนื่องจากไม่มี R_L ต่อในวงจร ดังนั้น $C_2 = \frac{\tau}{R_C}$	ตัวเก็บประจุคานขาออก	7.957 μF

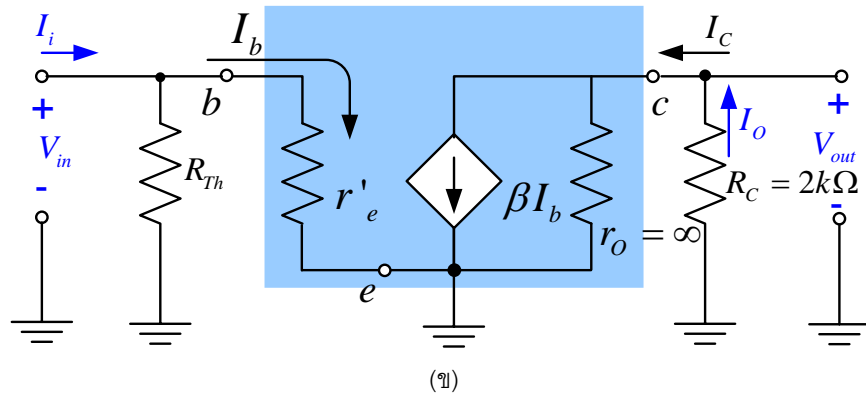
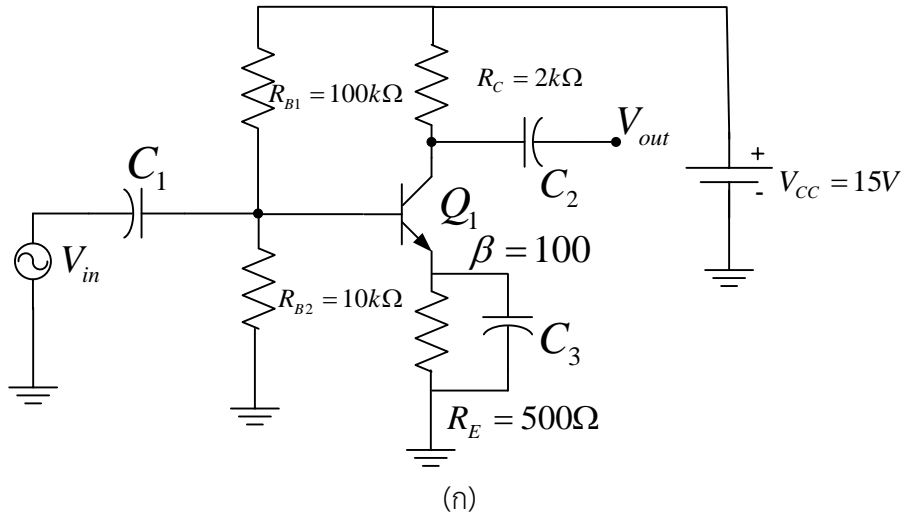


รูปที่ 6.8 กราฟ DC load line และจุด Q-Point

ตัวอย่างที่ 6.3 จากวงจรในรูปที่ 6.9 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ ซึ่งเป็นวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยมีการต่อ R_E ร่วมด้วย

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ $r_{in(total)}$
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ r_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขา E C_3
5. จงวาดกราฟ DC load line และหาจุด Q-Point

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ มีค่า $V_{BE}=0.7V$, $\beta=100$, และ V_{in} ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz



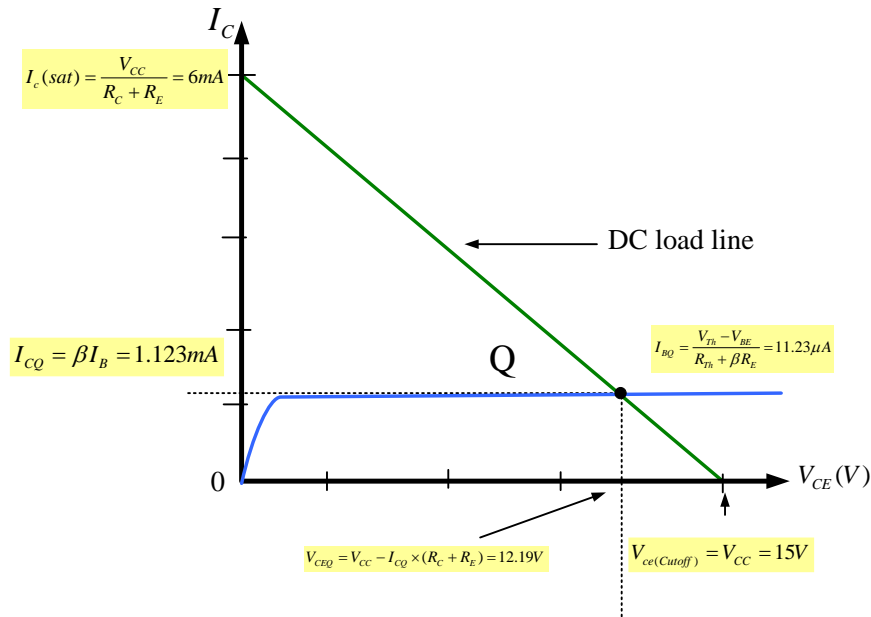
รูปที่ 6.9(ก) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยมีการต่อ R_E ร่วมด้วย
 (ข) วงจรสมมูลในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก

ตารางที่ 6.4 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ของ วงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม

ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์/สมการ	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1		$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่เข้าเบส	9.09 kΩ
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่เข้าเบส dc	1.363 V

3	DC	$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E}$	กระแสที่ขาเบส dc	11.23 μA
4		$I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ dc	1.123 mA
5		$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์	12.192 V
6	AC	$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	44.92 mA/V
7		$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m R_C$	อัตราขยายแรงดัน	-89.84
8		$r'_e \cong \frac{25mV}{I_E}$ เนื่องจาก $I_E \approx I_C$ ดังนั้น $r'_e \cong \frac{25mV}{I_C}$	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟท์กระแสลับ	22.26 Ω
9		$r_{in(base)} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \beta_{ac} r'_e$	ค่าความต้านทานเสมือนที่ขาเบส	2,226 Ω
10		$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุต	1.788 k Ω
11		$r_{out} = R_C$	ค่าความต้านทานเอาต์พุต	2 k Ω
12		$\tau = \frac{1}{2\pi f_C}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคำนวณจากค่าความถี่ที่น้อยที่สุดในโจทย์ใช้ 20Hz	0.00795 s
13		$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}}$ เนื่องจาก $R_S = 0$ ดังนั้น $C_1 = \frac{\tau}{r_{in(total)}}$	ตัวเก็บประจุคานขาเข้า	4.446 μF
14	$C_2 = \frac{\tau}{R_C + R_L}$ เนื่องจากไม่มี R_L ต่อในวงจร ดังนั้น $C_2 = \frac{\tau}{R_C}$	ตัวเก็บประจุคานขาออก	3.975 μF	

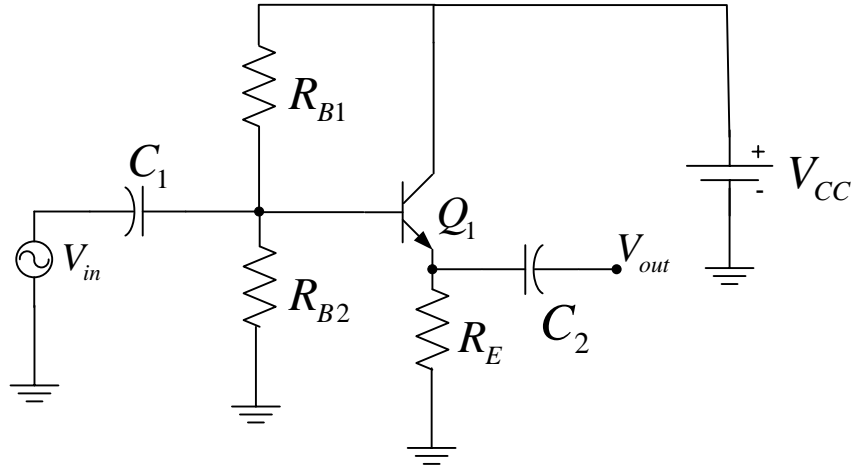
15	$X_{C_3} = \frac{R_E}{10}$ และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขา อิมิตเตอร์สามารถพิจารณาได้จาก $C_3 = \frac{1}{2\pi fX_{C_3}}$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ ขาอิมิตเตอร์	159.15 μF
----	---	---------------------------------------	----------------



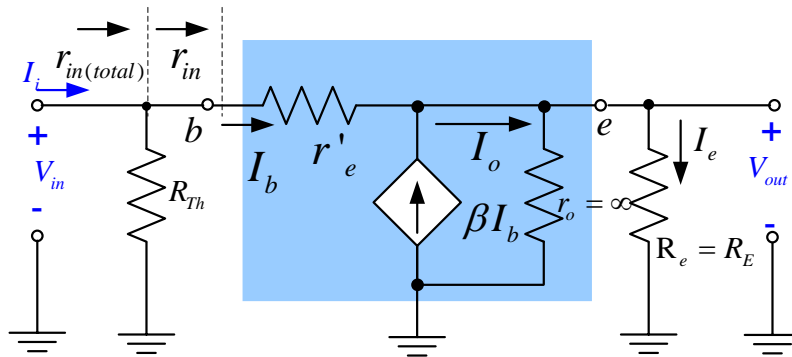
รูปที่ 6.10 กราฟ DC load line และจุด Q-Point

6.4 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดโพลาร์แบบคอลเล็กเตอร์ร่วม (Common-Collector Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวงจรตามแรงดันหรือ Emitter follower ดังแสดงในรูปที่ 6.11 เป็นวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยสัญญาณอินพุตจะถูกต่อเข้าที่ขาเบสเหมือนเดิมแต่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งออกจากขาอิมิตเตอร์แทน การทำงานของวงจรถือว่ามีสัญญาณเข้ามาที่ขาเบสทรานซิสเตอร์จะพยายามรักษาระดับแรงดันที่ขาเบสไปยังขาอิมิตเตอร์ให้คงที่ดังนั้นสัญญาณอินพุตจึงมีค่าเท่ากับสัญญาณเอาต์พุตนั่นเอง อัตราขยายแรงดัน A_v จึงมีค่าใกล้เคียง 1 รูปที่ 6.12 วงจรสมมูลย์ในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 6.11 วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 6.12 วงจรสมมูลในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน

ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมซึ่งจะมีขั้นตอนคล้ายๆกันกับการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อน โดยกระแสที่ขาเบสสามารถคำนวณได้จาก

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E} \quad (6.20)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 6.12 กระแสเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จาก

$$I_o = (1 + \beta)I_b \quad (6.21)$$

กรณีที่มีโหลดตัวต้านทาน R_L ความต้านทานรวมทางด้านขาออก

$$R_e = R_E \parallel R_L \quad (6.22)$$

แต่เนื่องจากในวงจรไม่มีโหลดตัวต้านทาน R_L ดังนั้นความต้านทานรวมทางด้านขาออก

$$R_e = R_E \quad (6.23)$$

ดังนั้นสามารถหาสมการของแรงดันขาออกได้ดังนี้

$$V_{out} = I_e R_e \quad (6.24)$$

สมการของแรงดันขาเข้าพิจารณาได้ดังนี้

$$V_{in} = I_b [r'_e + (1 + \beta)R_e] \quad (6.25)$$

เนื่องจาก $I_e = (1 + \beta)I_b$ ดังนั้นสมการที่ 6.25 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{in} = I_b r'_e + I_e R_e \quad (6.26)$$

จากสมการที่ 6.24 และสมการที่ 6.26 อัตราขยายแรงดัน A_v สามารถคำนวณได้จาก

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_e R_e}{I_b r'_e + I_e R_e} \quad (6.27ก)$$

เนื่องจากค่าของพจน์ $I_b r'_e$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของพจน์ $I_e R_e$ ดังนั้นค่าอัตราขยายแรงดัน A_v สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียง 1 $A_v \cong 1$

อัตราขยายกระแส A_i สามารถคำนวณได้จาก

$$A_i = \frac{I_e}{I_{in}} = \frac{I_e}{(V_{in} / R_{in(total)})} \quad (6.27ข)$$

ค่าความต้านทานขาเข้า

$$r_{in} = r'_e + (1 + \beta)R_e \quad (6.28)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสแบ่งแรงดัน รูปที่ 6.6 (ข)และ(ค) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$r_{in(total)} = r_{in} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2} \quad (6.29)$$

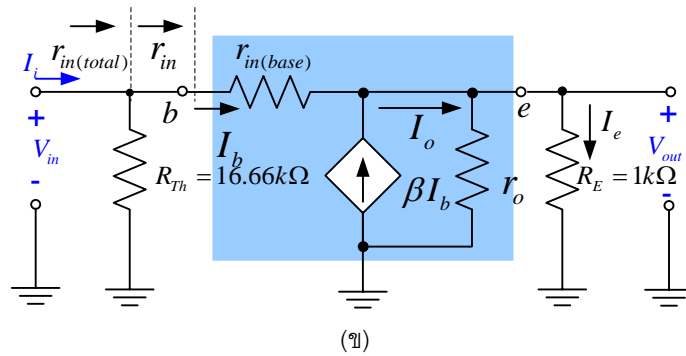
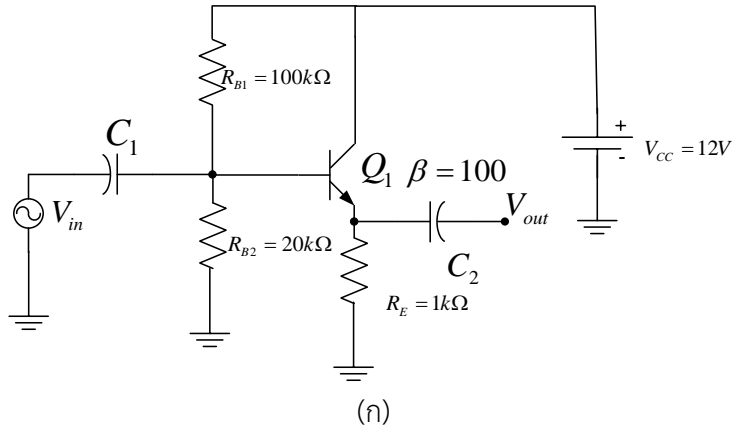
ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต

$$r_{out} = R_e \parallel r'_e \quad (6.30)$$

ตัวอย่างที่ 6.4 จากวงจรในรูปที่ 6.13 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ $r_{in(total)}$
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ r_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2
5. จงวาดกราฟ DC load line และหาจุด Q-Point

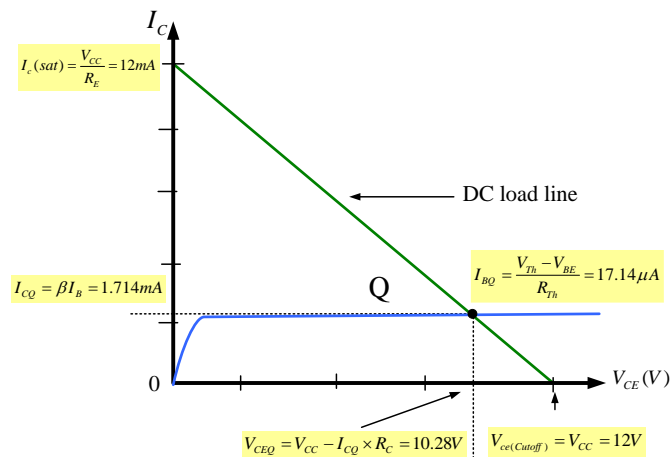
โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ มีค่า $V_{BE}=0.7V$, $\beta=100$, และ v_{in} ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz



รูปที่ 6.13 (ก) วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย
 ตารางที่ 6.4 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ของ
 วงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์แบบคอลเล็กเตอร์ร่วม

ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1	DC	$R_{Th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส	16.66 kΩ
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเบส	2 V
3		$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E}$	กระแสที่ขาเบส	17.14 μA
4		$I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์	1.714 mA
5		$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_E$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอีมิเตอร์	10.28 V
6			$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์

7	AC	$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_e R_e}{I_b r'_e + I_e R_e}$	อัตราขยายแรงดัน	1
8		$R_e = R_E$	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับ	1 kΩ
9		$r_{in(base)} = \beta_{ac} R_e$	ค่าความต้านทานเสมือนที่ขาเบสซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับ	100 kΩ
10		$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุต	14.285 kΩ
11		$r_{out} = R_e \parallel r'_e$	ค่าความต้านทานเอาต์พุต	14.37 Ω
12		$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคำนวณจากค่าความถี่ที่น้อยที่สุดในโจทย์ใช้ 20Hz	0.00795 s
13		$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}}$ เนื่องจาก $R_S = 0$ ดังนั้น $C_1 = \frac{\tau}{r_{in(total)}}$	ตัวเก็บประจุคานขาเข้า	0.55 μF
14		$C_2 = \frac{\tau}{R_e \parallel r'_e + R_L}$ เนื่องจากไม่มี R_L ต่อ ในวงจร ดังนั้น $C_2 = \frac{\tau}{R_e \parallel r'_e}$	ตัวเก็บประจุคานขาออก	55.32 μF



รูปที่ 6.14 กราฟ DC load line และจุด Q-Point

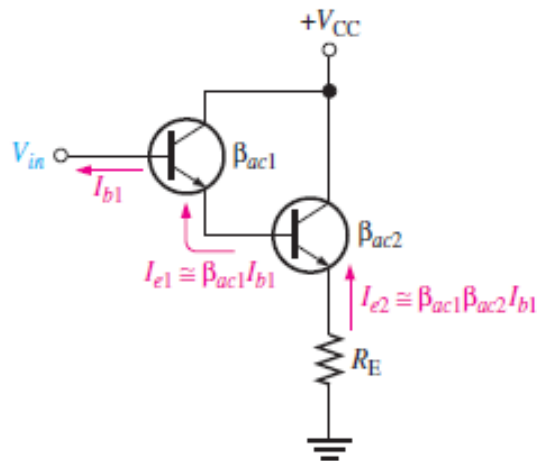
ทรานซิสเตอร์คู่แบบดาร์ลิ่งตัน (Darlington Pair)

เป็นการนำทรานซิสเตอร์ชนิด NPN 2 ตัวมาต่อรวมกันโดยขาคอลเล็กเตอร์ต่อรวมกันใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวกัน ส่วนขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 ต่อไปยังขาเบสของทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6.15 ซึ่งการเชื่อมต่อแบบนี้ทำให้อัตราขยาย β_{ac} คูณกัน

$$\beta_{ac(darlington)} = \beta_{ac1} \times \beta_{ac2} \quad (6.31)$$

ความต้านทานฝั่งขาเข้าหาได้จาก

$$R_{in} = \beta_{ac1} \beta_{ac2} R_E \quad (6.32)$$



รูปที่ 6.15 ทรานซิสเตอร์คู่แบบดาร์ลิ่งตัน (Darlington Pair)

ที่มา: Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคุณลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมมีความต้านทานฝั่งขาเข้าสูงและความต้านทานฝั่งขาออกต่ำและมีอัตราขยายใกล้เคียง 1 และเป็นการขยายแบบไม่กลับเฟสสัญญาณ ซึ่งมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวงจรตามแรงดัน (Emitter Follower) โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกันชน (Buffer) วงจรในรูปที่ 6.16 เป็นการนำวงจรขยายสัญญาณแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิ่งตันประยุกต์ใช้เป็นวงจรกันชน (Buffer) สมมุติว่าวงจรขยายสัญญาณเสียงที่ใช้งานอิมิตเตอร์ร่วมซึ่งมีความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์ $1k\Omega$ ซึ่งถ้าจะ

ซัปโหลดที่เป็นลำโพงโดยตรง เช่นลำโพงที่ใช้ในงานกำลังต่ำจะมีค่าความต้านทานในตัว 8Ω ดังนั้นทำให้ความต้านทานรวมคือการมีความต้านทานสองตัวขนานกันซึ่งแน่นอนจะทำให้ความต้านทานรวมมีค่าน้อยตามค่าความต้านทานภายในของลำโพงที่มาขนานอยู่นั่นเอง

$$R_c = R_C \parallel R_L = 1k\Omega \parallel 8\Omega = 7.94\Omega$$

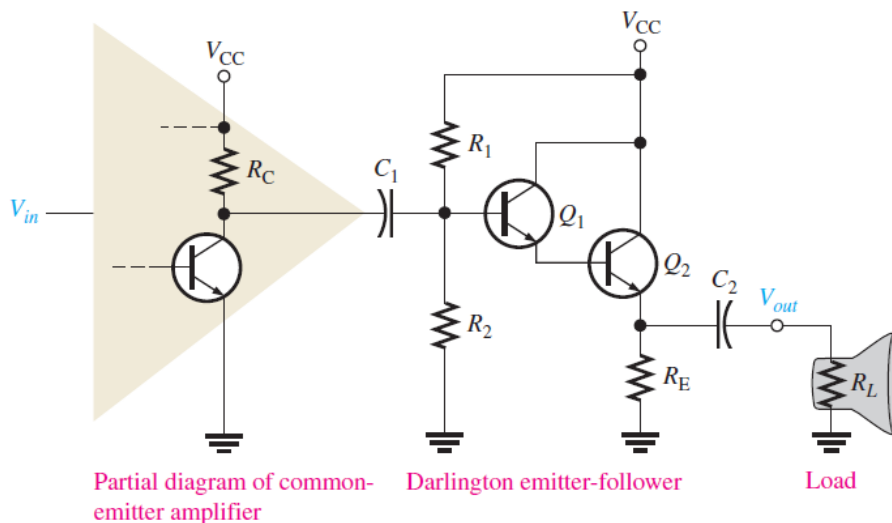
ซึ่งจากการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม ($A_v = R_c / r'_e$) ยกตัวอย่างเช่นถ้า r'_e มีค่าเท่ากับ 10 Ω ดังนั้นในขณะไม่ต่อลำโพง No load อัตราขยายจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$A_v = \frac{R_c}{r'_e} = \frac{1k\Omega}{10} = 100$$

ในขณะที่ต่อลำโพง With load อัตราขยายจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$A_v = \frac{R_c}{r'_e} = \frac{7.94\Omega}{10} = 0.794$$

ดังนั้นอัตราขยายแรงดันลดลงอย่างมากเนื่องจากได้รับผลกระทบโดยตรงจากโหลดซึ่งเป็นลำโพงมีค่าความต้านทานน้อย ดังนั้นจึงนำวงจรทรานซิสเตอร์คู่แบบดาร์ลิงตัน (Darlington Pair) เข้ามาแก้ปัญหาและเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้มากขึ้น



รูปที่ 6.15 เป็นการนำวงจรขยายสัญญาณแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิงตันประยุกต์ใช้เป็นวงจรถูกกันชน (Buffer) ในวงจรเครื่องขยายเสียง

ที่มา: Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992

จากวงจรสมมุติว่าที่วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมมี $V_{CC} = 12V$ $R_c = 1k\Omega$ r'_e มีค่าเท่ากับ 10

และวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตันมี $R_1 = 10k\Omega$ $R_2 = 22k\Omega$ $R_E = 22\Omega$ $R_L = 8\Omega$

$\beta_{DC} = \beta_{ac} = 100$ สำหรับแต่ละทรานซิสเตอร์ และสมมุติว่าละทิ้ง $R_{in(base)}$ ที่ทรานซิสเตอร์คู่คาร์ลิงตัน

จงหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. หาค่า $A_{v(CE)}$ ที่วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม
2. หาค่า $A_{v(EF)}$ ที่วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน
3. หาค่า $A_{v(total)}$ ที่วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่เชื่อมต่อไปยังโหลดที่เป็นลำโพงโดยตรง
4. หาค่า A_v ที่วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่เชื่อมต่อไปยังโหลดที่เป็นลำโพงโดยผ่านวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน

ตารางที่ 6.5 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis และ ac analysis ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมและวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน

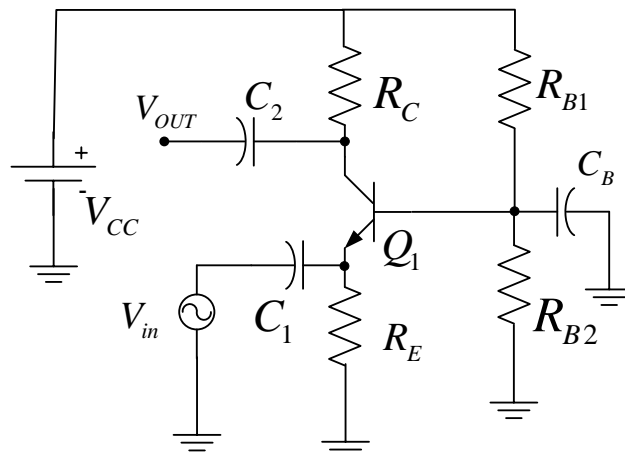
ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1	DC	$R_{Th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม แบบคาร์ลิงตัน	6.875 k Ω
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่ง แรงดันที่ขาเบสวงจรขยายคอล เล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน	8.25 V
3		$I_E = \frac{V_{Th} - 2V_{BE}}{R_E}$	กระแสที่ขาอิมิตเตอร์วงจรขยาย คอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิง ตัน	311 mA
4		$r'_e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{311mA}$	ค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้า กระแสลั้บวงจรขยายคอลเล็ก เตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน	80 m Ω
5		$R_e = R_E \parallel R_L = 22 \parallel 8 = 5.87\Omega$	ความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม แบบคาร์ลิงตัน	5.87 Ω
6		$r_{in(total)} = \beta_{ac}^2 (r'_e + R_e) \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$ $= 100^2 (80m\Omega + 5.87\Omega) \parallel 10k\Omega \parallel 22k\Omega$	ค่าความต้านทานอินพุตรวม วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม แบบคาร์ลิงตัน	6.16 k Ω

7	AC	$R_c = R_C \parallel R_{in(total)} = 1k\Omega \parallel 6.16k\Omega$	ผลกระทบต่อความต้านทานที่ ขาคอลเล็กเตอร์ที่วงจร คอลเล็กเตอร์ร่วม	860 Ω
8		$A_{v(EF)} = \frac{R_c}{r'_e} = \frac{860}{10}$	อัตราขยายแรงดันของ วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	86
9		$A_{v(CE)} = \frac{R_e}{r'_e + R_e} = \frac{5.87\Omega}{80m\Omega + 5.87\Omega}$	อัตราขยายแรงดันวงจรขยาย คอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิง ตัน	0.99
10		$A_{v(total)} = A_{v(EF)} \times A_{v(CE)} = (0.99) \times (86)$	อัตราขยายแรงดัน รวมของวงจรขยายอิมิตเตอร์ ร่วมและวงจรขยายคอลเล็ก เตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน	85.14
11		$A_v = \frac{R_c}{r'_e} = \frac{7.94\Omega}{10} = 0.794$	อัตราขยายแรงดัน กรณีไม่มีวงจรขยายคอลเล็ก เตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน	0.794

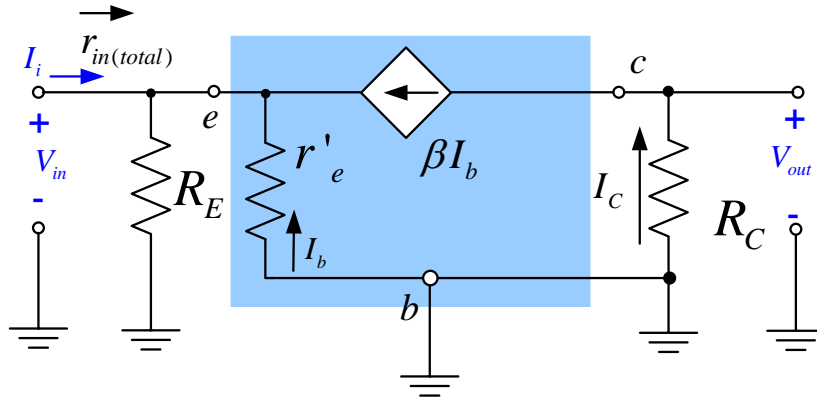
6.5 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์แบบเบสร่วม (Common-Base Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม ดังแสดงในรูปที่ 6.16 เป็นวงจรขยายเบสร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยสัญญาณอินพุตจะถูกต่อเข้ากับขาอิมิตเตอร์แต่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งออกทางขาคอลเล็กเตอร์แทน รูปที่

6.17 วงจรสมมูลย์ในการวิเคราะห์ห้สัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเบสร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 6.16 วงจรขยายเบสร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 6.17 วงจรสมมูลในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเบสรวมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน

ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบเบสซึ่งก็จะมีขั้นตอนคล้ายๆกันกับการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมและแบบคอลเล็กเตอร์ร่วม อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อน โดยกระแสที่ขาเบสสามารถคำนวณได้จาก

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E} \quad (6.33)$$

กรณีที่มีโหลดตัวต้านทาน R_L ความต้านทานรวมทางด้านขาออก

$$R_c = R_C \parallel R_L \quad (6.34)$$

แต่เนื่องจากในวงจรไม่มีโหลดตัวต้านทาน R_L ดังนั้นความต้านทานรวมทางด้านขาออก

$$R_c = R_C \quad (6.35)$$

ดังนั้นสามารถหาสมการของแรงดันขาออกได้ดังนี้

$$V_{out} = I_c R_c \quad (6.36)$$

สมการของแรงดันขาเข้าพิจารณาได้ดังนี้

$$V_{in} = I_e [r'_e \parallel R_E] \quad (6.37)$$

จากสมการที่ 6.36 และสมการที่ 6.37 อัตราขยายแรงดัน A_v สามารถคำนวณได้จาก

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_c R_c}{I_e (r'_e \parallel R_E)} \quad (6.38)$$

ถ้า $R_E \gg r'_e$ และ $I_e \cong I_c$ ดังนั้นค่าอัตราขยายแรงดัน A_v สามารถคำนวณได้จาก

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_c}{r'_e} \quad (6.39)$$

ค่าความต้านทานขาเข้าที่ขาอิมิตเตอร์

$$r_{in} \cong r'_e \quad (6.40)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสแบ่งแรงดัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$r_{in(total)} = r_{in} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2} \quad (6.41)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต

$$r_{out} \cong R_c \quad (6.42)$$

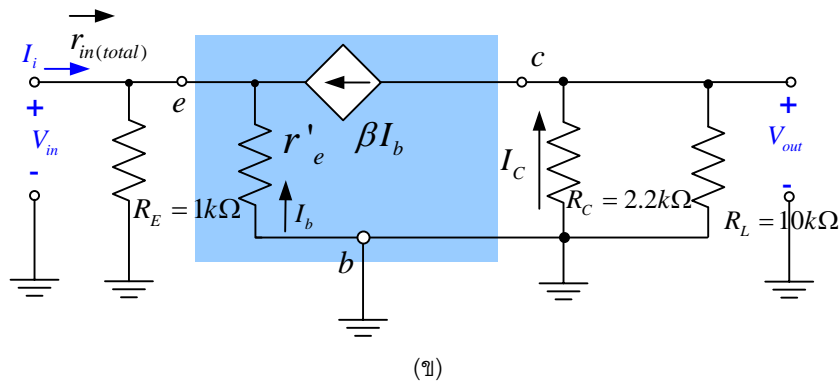
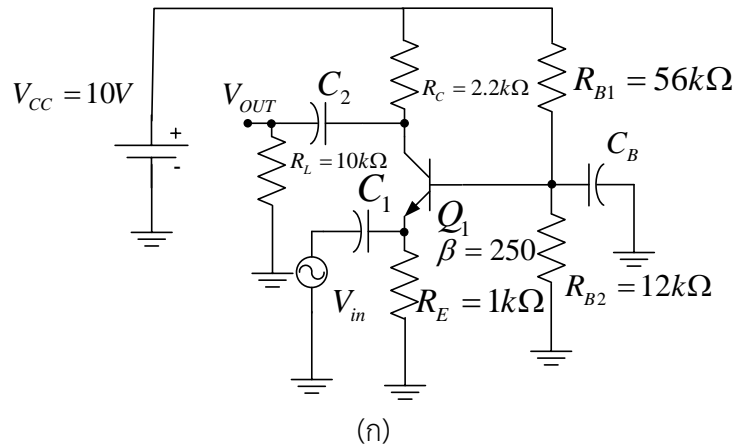
อัตราขยายกระแส A_i สามารถคำนวณได้จาก

$$A_i = \frac{I_c}{I_e} \cong 1 \quad (6.43)$$

ตัวอย่างที่ 6.5 จากวงจรในรูปที่ 6.18 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ $r_{in(total)}$
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ r_{out}
4. ตัวเก็บประจุด้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2 และ C_B

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ มีค่า $V_{BE} = 0.7V$, $\beta = 250$, และ V_{in} ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz



รูปที่ 6.18 (ก) วงจรขยายเบสร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูล

ตารางที่ 6.6 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ของวงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์แบบเบสร่วม

ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1	DC	$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส	9.88 kΩ
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเบส	1.76 V
3		$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E}$	กระแสที่ขาเบส	4.07 μA
4		$I_E \cong I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาอิมิตเตอร์และขาคอลเล็กเตอร์	1.02 mA
5		$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์	3.26 V
6	AC	$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	40.8 mA/V
7		$r'_e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{1.02mA}$	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้ากระแสสลับ	24.5 Ω
8		$R_c = R_C \parallel R_L$	ค่าความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์	1.8 kΩ
9		$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_c}{r'_e}$	อัตราขยายแรงดัน	73.5
10		$r_{in} \cong r'_e$	ความต้านทานขาเข้า	24.5 Ω
11		$r_{in(total)} = r_{in} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุต	24.439 Ω
12		$r_{out} = R_c$	ค่าความต้านทานเอาต์พุต	1.8 kΩ
13		$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคำนวณจากค่าความถี่ที่น้อยที่สุดในโจทย์ใช้ 20Hz	0.00795 s

14	$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}} \text{ เนื่องจาก } R_S = 0$ <p>ดังนั้น $C_1 = \frac{\tau}{r_{in(total)}}$</p>	ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า	325.99 μF
15	$C_2 = \frac{\tau}{R_C + R_L} \text{ เนื่องจากไม่มี } R_L \text{ ต่อใน}$ <p>วงจร ดังนั้น $C_2 = \frac{\tau}{R_C}$</p>	ตัวเก็บประจุต้านขาออก	4.41 μF
16	$X_{C_B} = \frac{R_{Th}}{10} \text{ และตัวเก็บประจุบายพาสที่}$ <p>ขาอิมิตเตอร์สามารถพิจารณาได้จาก</p> $C_B = \frac{1}{2\pi f X_{C_B}}$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ ขาเบส	8.05 μF

ตาราง 6.7 สรุปคุณลักษณะของวงจรขยายสัญญาณของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ทั้ง 3 แบบ

พารามิเตอร์	อิมิตเตอร์ร่วม Common Emitter	คอลเล็กเตอร์ร่วม Common Collector	เบสร่วม Common Base
อัตราขยายแรงดัน A_v	สูง R_C / r'_e	ต่ำ $\cong 1$	สูง R_C / r'_e
อัตราขยายกระแส A_i	สูง β_{ac}	สูง β_{ac}	ต่ำ $\cong 1$
อัตราขยายกำลัง A_p	สูงมาก $A_i A_v$	สูง $\cong A_i$	สูง $\cong A_v$
ความต้านทานรวมขาเข้า R_{in}	ต่ำ $\beta_{ac} r'_e$	สูง $\beta_{ac} R_E$	ต่ำมาก r'_e
ความต้านทานรวมขาออก R_{out}	สูง R_C	ต่ำมาก $(R_S / \beta_{ac}) \parallel R_E$	สูง R_C
เฟสของการขยายสัญญาณ	กลับเฟส	ไม่กลับเฟส	ไม่กลับเฟส

ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้ งาน	วงจรเครื่องขยาย เสียง วงจรขยาย สัญญาณจาก เซ็นเซอร์	วงจรกันชนแรงดัน Buffer	วงจรขยายความถี่สูงที่ ต้องการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เนื่องจากอินพุตอิมพี แดนซ์สามารถควบคุมได้
-----------------------------------	---	------------------------	---

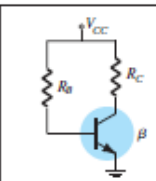
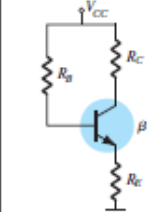
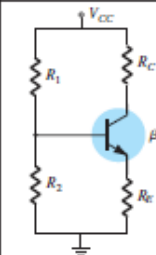
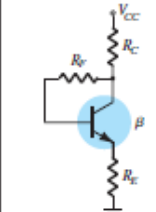
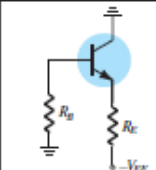
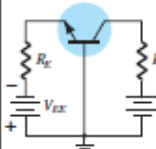
เอกสารอ้างอิง

1. Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992
2. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
3. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.
4. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/11551/ONSEMI/BC547.html>
5. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15077/PHILIPS/2N3904.html>
6. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1093983/ISC/2N3906.html>

เอกสารประกอบเพิ่มเติม

1. สรุปการจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์แบบต่างๆ

TABLE 4.1
BJT Bias Configurations

Type	Configuration	Pertinent Equations
Fixed-bias		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$
Emitter-bias		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $R_i = (\beta + 1)R_E$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$
Voltage-divider bias		<p>EXACT: $R_{Th} = R_1 R_2, E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$ APPROXIMATE: $\beta R_E \geq 10R_2$</p> $I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$ <p>$V_B = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}, V_E = V_B - V_{BE}$</p> $I_E = \frac{V_E}{R_E}, I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$
Collector-feedback		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$
Emitter-follower		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_E R_E$
Common-base		$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$ $I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}, I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{EE} + V_{CC} - I_E(R_C + R_E)$ $V_{CB} = V_{CC} - I_C R_C$

ที่มา: Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.

ใบงานที่ 6. วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์
- 1.2 เพื่อศึกษาการคำนวณ การจำลอง และการทดลองจริงของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์และสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

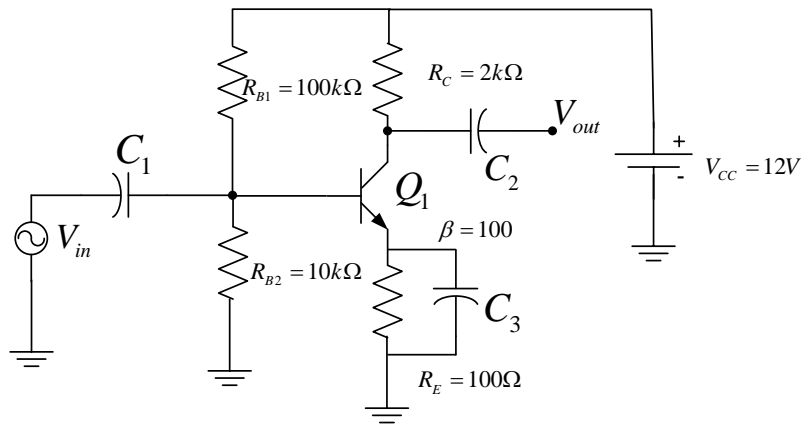
1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 3 ตัว
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
5. แอมป์มิเตอร์ 2 ตัว
6. โวลต์มิเตอร์
7. ออสซิลโลสโคป
8. ตัวต้านทาน $100\text{ k}\Omega$, $75\text{ k}\Omega$, $50\text{ k}\Omega$, $100\ \Omega$
9. อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ

การทดลองที่ 6.1

6.1.1 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ ซึ่งเป็นวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยมีการต่อ R_E ร่วมด้วย

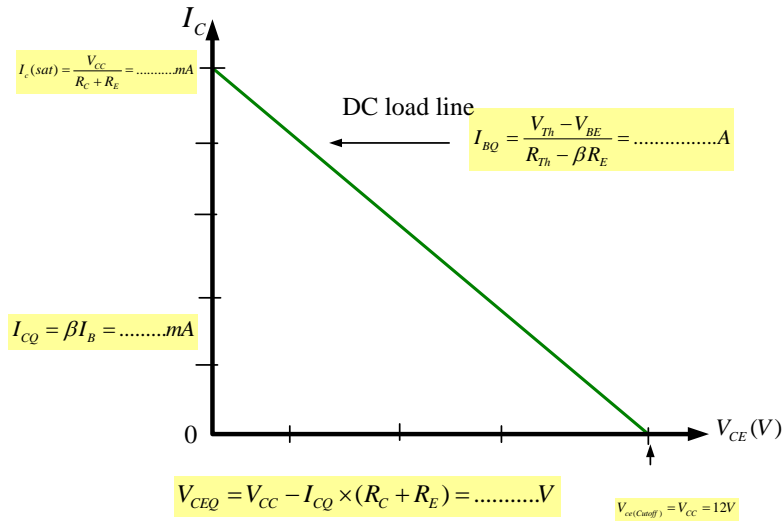
1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ $r_{in(total)}$
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ r_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขา E C_3
5. จงวาดวงจรสมมูลให้ถูกต้อง
6. จงวาดกราฟ DC load line และหาจุด Q-Point

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ มีค่า $V_{BE}=0.7V$, $\beta=100$, และ v_{in} ซึ่งเป็นสัญญาณ Sine Wave Amplitude = $\pm 25mV$ ความถี่ 1 kHz แต่การออกแบบให้เลือกความถี่ตัดที่ต่ำสุดในความถี่เสียง = 20 Hz



รูปที่ 6.18 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยมีการต่อ R_E ร่วมด้วย

6.1.2 จงพลอตกราฟ DC load line และจุด Q-Point

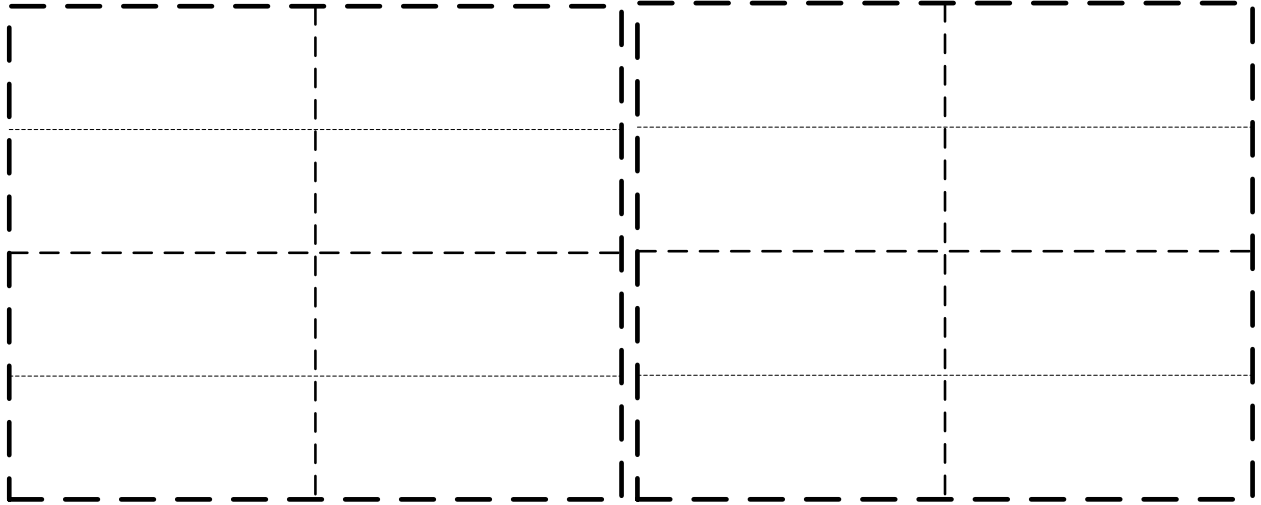


ตารางที่ 6.8 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ของวงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม

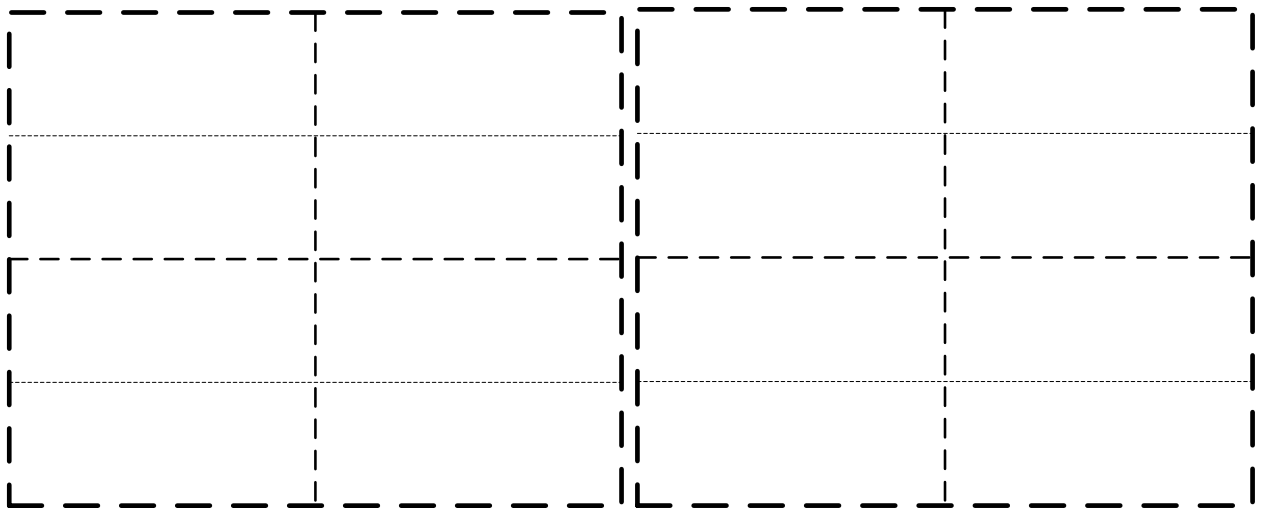
ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์/สมการ	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1	DC	$R_{Th} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส	$k\Omega$
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเบส dc	V
3		$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta R_E}$	กระแสที่ขาเบส dc	A
4		$I_C = \beta I_B$	กระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ dc	A
5		$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$	แรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์	V
6		$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{25mV}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	mA/V
7		$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m R_C$	อัตราขยายแรงดัน	

8	AC	$r'_e \cong \frac{25mV}{I_E}$ เนื่องจาก $I_E \approx I_C$ ดังนั้น $r'_e \cong \frac{25mV}{I_C}$	ความต้านทานภายในขาอิมิตเตอร์ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้้ากระแสสลับ	Ω
9		$r_{in(base)} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \beta_{ac} r'_e$	ค่าความต้านทานเสมือนที่ขาเบส	Ω
10		$r_{in(total)} = r_{in(base)} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุต	$k\Omega$
11		$r_{out} = R_C$	ค่าความต้านทานเอาต์พุต	$k\Omega$
12		$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคำนวณจากค่าความถี่ที่น้อยที่สุดในโจนท์ใช้ 20Hz	s
13		$C_1 = \frac{\tau}{R_S + r_{in(total)}}$ เนื่องจาก $R_S = 0$ ดังนั้น $C_1 = \frac{\tau}{r_{in(total)}}$	ตัวเก็บประจุคานขาเข้า	μF
14		$C_2 = \frac{\tau}{R_C + R_L}$ เนื่องจากไม่มี R_L ต่อในวงจร ดังนั้น $C_2 = \frac{\tau}{R_C}$	ตัวเก็บประจุคานขาออก	μF
15	$X_{C_3} = \frac{R_E}{10}$ และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาอิมิตเตอร์สามารถพิจารณาได้จาก $C_3 = \frac{1}{2\pi f X_{C_3}}$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาอิมิตเตอร์	μF	

6.1.3 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 6.18 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



6.1.4 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 6.18 โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

การทดลองที่ 6.2 จากวงจรที่ นำค่าที่คำนวณได้จากวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วมในการทดลองที่ 6.1 ซึ่งมี

$$V_{CC} = 12V \quad R_c = 2k\Omega \quad r'_e = \dots\dots\dots$$

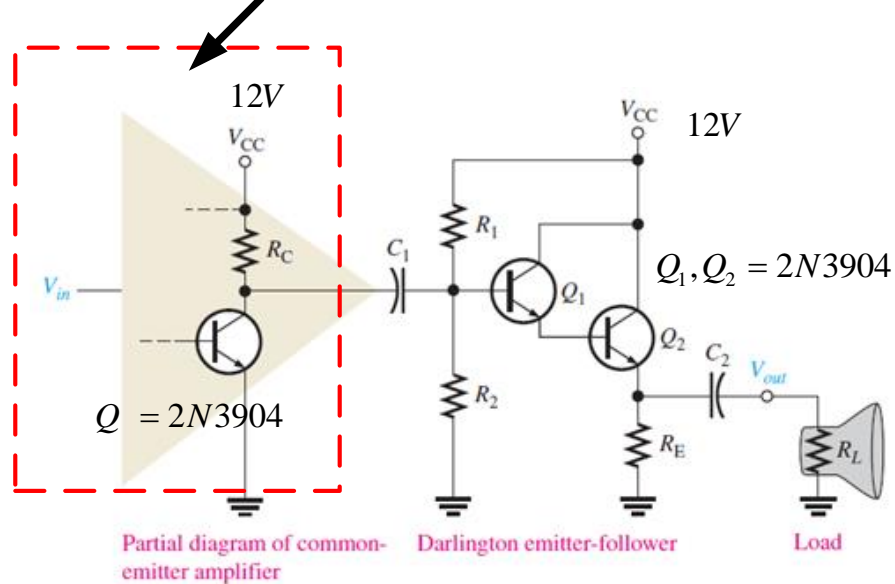
และวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตันมี $R_1 = 50k\Omega \quad R_2 = 100k\Omega \quad R_E = 20\Omega \quad R_L = 8\Omega$ (ลำโพง)

$\beta_{DC} = \beta_{ac} = 100$ (อ้างอิงจากทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904) สำหรับแต่ละทรานซิสเตอร์ และสมมุติว่าละทิ้ง $R_{in(base)}$ ที่ ทรานซิสเตอร์คู่คาร์ลิงตัน

6.2.1 จงหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. หาค่า $A_{v(CE)}$ ที่วงจขยายอิมิตเตอร์ร่วม
2. หาค่า $A_{v(EF)}$ ที่วงจขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน
3. หาค่า $A_{v(total)}$ ที่วงจขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่เชื่อมต่อไปยังโหลดที่เป็นลำโพงโดยตรง(ใช้ตัวต้านทานแทนลำโพง)
4. หาค่า A_v ที่วงจขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่เชื่อมต่อไปยังโหลดที่เป็นลำโพงโดยผ่านวงจขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิงตัน

วงจรในการทดลองที่ 6.1



รูปที่ 6.19 การนำวงจรขยายสัญญาณแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิงตันประยุกต์ใช้เป็นวงจรกันชน (Buffer) ในวงจรเครื่องขยายเสียง

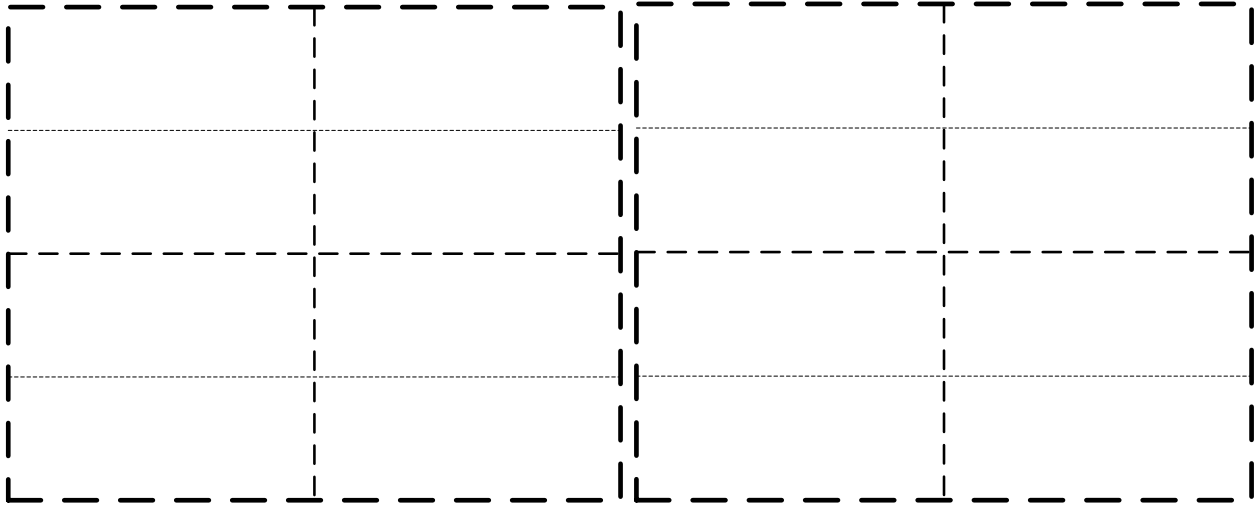
(ที่มา: Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992)

ตารางที่ 6.9 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis และ ac analysis ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมและวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิงตัน

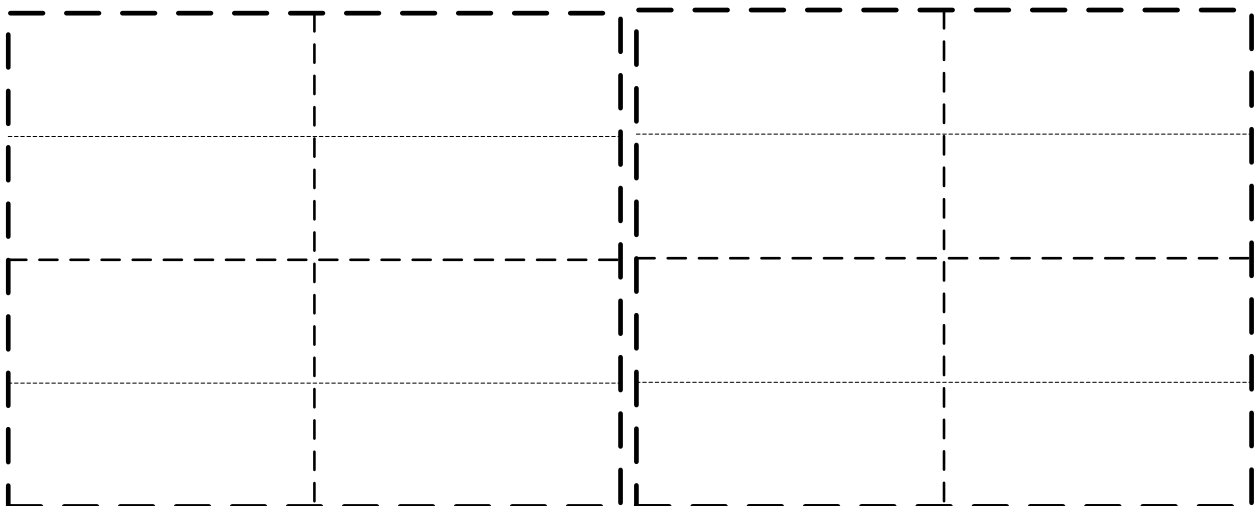
ลำดับ	การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
1	DC	$R_{Th} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเบส วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม แบบดาร์ลิงตัน	Ω
2		$V_{Th} = \left(\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \right) \times V_{CC}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่ง แรงดันที่ขาเบสวงจรขยายคอล เล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิงตัน	V
3		$I_E = \frac{V_{Th} - 2V_{BE}}{R_E}$	กระแสที่ขาอิมิตเตอร์วงจรขยาย คอลเล็กเตอร์ร่วมแบบดาร์ลิง ตัน	A
4		$r'_e = \frac{25mV}{I_E}$	ค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ ซึ่งวิเคราะห์ในแบบไฟฟ้า	Ω

			กระแสลั้บวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	
5	AC	$R_e = R_E \parallel R_L$	ความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์วงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	Ω
6		$r_{in(total)} = \beta^2_{ac} (r'_e + R_e) \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$	ค่าความต้านทานอินพุตรวมวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	Ω
7		$R_c = R_C \parallel R_{in(total)}$ ใช้ค่า R_C จากการทดลองที่ 6.1	ผลกระทบต่อความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์ที่วงจรคอลเล็กเตอร์ร่วม	Ω
8		$A_{v(CE)} = \frac{R_c}{r'_e}$ ใช้ค่าที่ได้จากการทดลองที่ 6.1	อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	
9		$A_{v(EF)} = \frac{R_e}{r'_e + R_e}$	อัตราขยายแรงดันวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	
10		$A_{v(total)} = A_{v(EF)} \times A_{v(CE)}$	อัตราขยายแรงดันรวมของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมและวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	
11		$A_v = \frac{R_c}{r'_e}$	อัตราขยายแรงดันกรณีไม่มีวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วมแบบคาร์ลิ่งตัน	
12		$C_1 = \frac{\tau}{R_C + R_L}$ $R_L = R_{in(total)}$ จากวงจรคาร์ลิ่งตัน $\tau = \frac{1}{2\pi f_C}$	ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่าง 2 วงจร	μF
12		$C_2 = \frac{\tau}{r_{out} + R_L}$ $r_{out} = R_e \parallel r'_e$ $R_L = 8\Omega$	ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรคาร์ลิ่งตันและโหลด	μF

6.2.2 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 6.19 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out} (ตรงลำโพง)



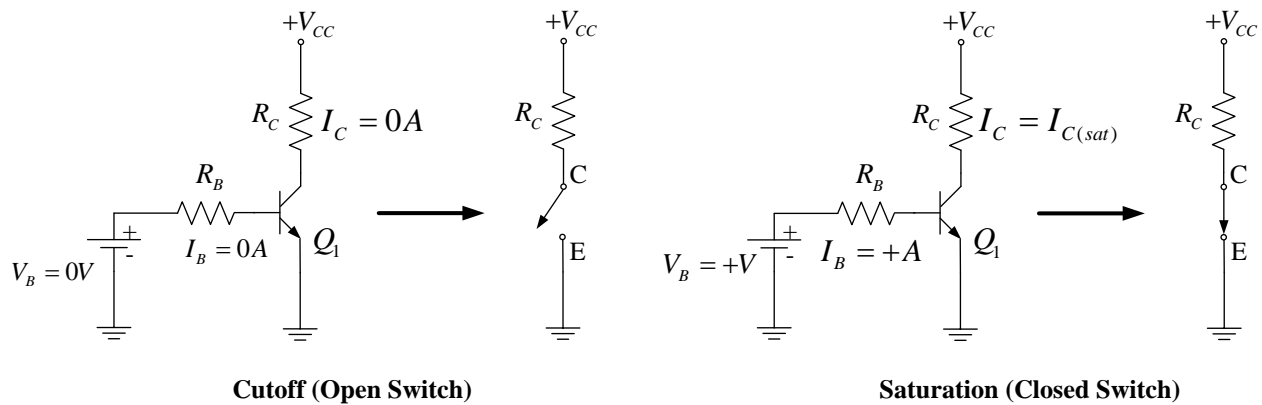
6.2.3 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 6.19 โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904จากการทดลองที่ 6.1 และใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 สำหรับทรานซิสเตอร์คู่คาร์ลิงตัน พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out} (ตรงลำโพง)



บทที่ 7 การใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

7.1 คุณสมบัติของการใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

รูปที่ 7.1 แสดงการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์ในอุดมคติ โดยจะมีการทำงานอยู่ 2 สถานะคือ สถานะสวิตช์เปิด (Open Switch) โดยแสดงในรูปทางด้านซ้ายมือ ทรานซิสเตอร์จะทำงานในย่านคัทออฟ (Cutoff) โดยขาเบสไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังขาอิมิตเตอร์เนื่องจากไม่ได้รับแรงดันไบแอสที่เพียงพอจากแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับขาเบส ($V_B = 0$) ซึ่งส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลจากขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์ทำให้เกิดสถานะเปิดวงจรนั่นเอง แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์เทียบกับกราวด์มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟ ส่วนอีกสถานะหนึ่งคือ สถานะสวิตช์ปิด (Closed Switch) โดยแสดงในรูปทางด้านขวามือ ทรานซิสเตอร์จะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation) โดยขาเบสมีกระแสไหลผ่านไปยังขาอิมิตเตอร์เนื่องจากได้รับแรงดันไบแอสที่เหมาะสมจากแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับขาเบส ($V_B = +V$) ซึ่งส่งผลให้มีกระแสไหลจากขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์จนถึงจุดอิ่มตัว ($I_C = I_{C(sat)}$) ทำให้เกิดสถานะปิดหรือเชื่อมต่อวงจรนั่นเอง แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์เทียบกับกราวด์มีค่าใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 7.1 การทำงานเป็นสวิตช์ในทางอุดมคติของทรานซิสเตอร์

ในรูปที่ 7.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์และแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ซึ่งจะใช้งานแค่สองสถานะเท่านั้น โดยในสถานะคัทออฟ (Cutoff)

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC} \tag{7.1}$$

และในสถานะอิ่มตัวปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์อีกต่อไป พุดได้อีกอย่างคือเหมือนเราเปิดวาล์วน้ำเต็มที แต่กระแสน้ำที่ไหลนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟ V_{CC} ลบกับค่าระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์ในสถานะอิ่มตัว $V_{CE(sat)}$ ซึ่งส่วนใหญ่ผู้ผลิตจะแสดงค่านี้ในคู่มืออุปกรณ์หารด้วยค่าของตัวต้านทานที่ต่ออยู่ขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์นั่นเอง

กรณีวงจรที่มีเฉพาะตัวต้านทานต่อที่ขาคอลเล็กเตอร์ R_C

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} \quad (7.2)$$

กรณีวงจรที่มีเฉพาะตัวต้านทานต่อที่ขาอิมิตเตอร์ R_E

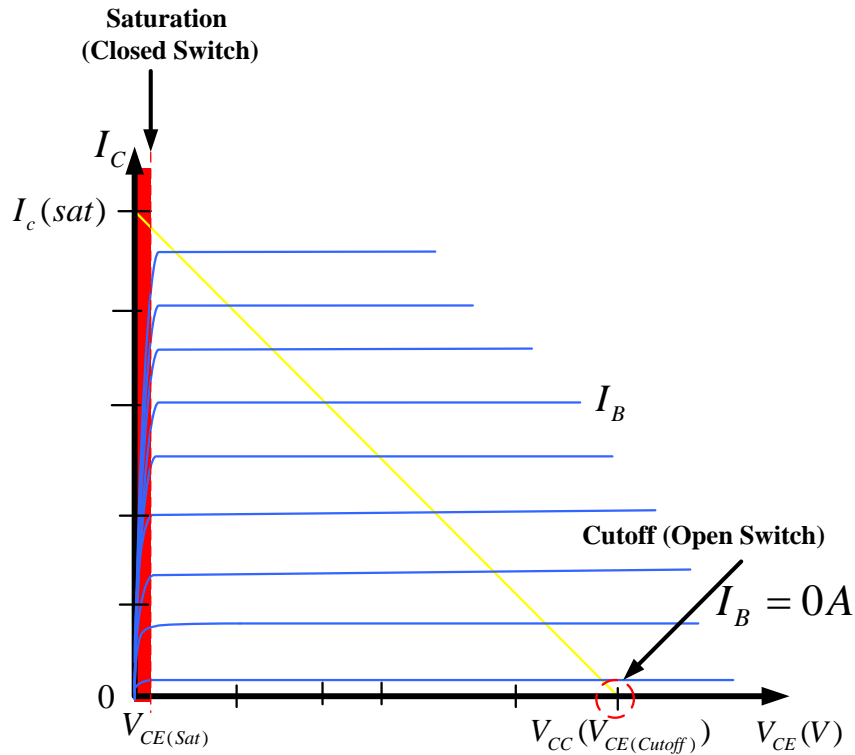
$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_E} \quad (7.3)$$

กรณีวงจรที่มีทั้งตัวต้านทานต่อที่คอลเล็กเตอร์ R_C และขาอิมิตเตอร์ R_E

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C + R_E} \quad (7.4)$$

แต่เนื่องจากค่า $V_{CE(sat)}$ มีค่าน้อยมากๆเมื่อเทียบกับแรงดันที่แหล่งจ่าย V_{CC} จึงสามารถละทิ้งค่านี้ออกจากสมการที่ 7.2 ถึง 7.4 และค่ากระแสที่ขาเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวสามารถพิจารณาได้จาก

$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE}} \quad (7.5)$$



รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์และแรงดันระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์

ตัวอย่างที่ 7.1 จากวงจรในรูปที่ 7.3 จงหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

7.1.1 จงหาค่า V_{CE} เมื่อ $V_B = 0V$

7.1.2 ค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 100 (โดยละทิ้งค่า $V_{CE(sat)}$)

7.1.3 คำนวณหาค่าตัวต้านทานที่ขาเบส $R_{B(max)}$ เมื่อ $V_B = 2.5V$

วิธีทำ

7.1.1 ค่า V_{CE} เมื่อ $V_B = 0V$

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC} = 10V$$

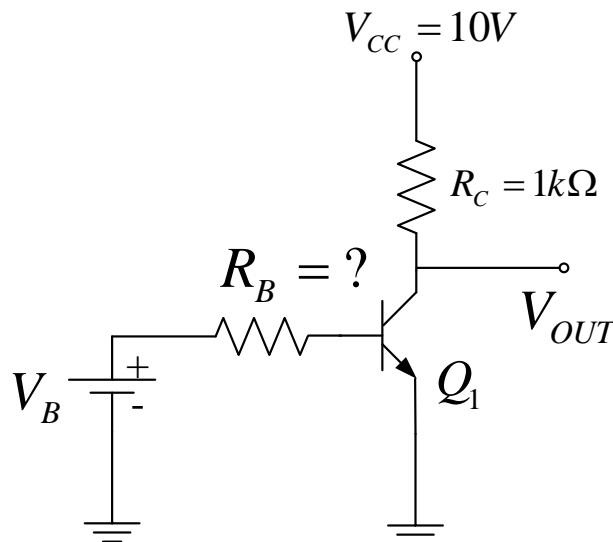
7.1.2 ค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 100 (โดยละทิ้งค่า $V_{CE(sat)}$)

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{10 - 0}{1k\Omega} = 10mA$$

$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{10mA}{100} = 0.1mA$$

7.1.3 คำนวณหาค่าตัวต้านทานที่ขาเบส $R_{B(max)}$ เมื่อ $V_B = 2.5V$

$$R_{B(max)} = \frac{V_B - V_{BE}}{I_{B(min)}} = \frac{2.5 - 0.7}{0.1mA} = 18k\Omega$$



รูปที่ 7.3 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ที่ใช้ในการพิจารณา

ตัวอย่างที่ 7.2 จากวงจรในรูปที่ 7.4 จงหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้ $V_{CC} = 10V$, $V_{CE(sat)} = 0.3V$, $\beta_{DC} = 75$, $V_{LED} = 3.6V$, $I_{LED(max)} = 30mA$, $R_B = 3k\Omega$

7.2.1 คำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_C ที่เหมาะสม

7.2.2 คำนวณหาค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 75

7.2.3 คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ขาเบส โดยต้องมั่นใจว่าสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวได้โดยเนื่องจากค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุด 2 เท่า เพื่อมั่นใจว่าจะสามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังไว้

วิธีทำ

7.2.1 คำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_C ที่เหมาะสม

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{CE(sat)}}{I_{LED(max)}} = \frac{10 - 3.6 - 0.3}{30mA} = 203.33\Omega$$

7.2.2 คำนวณหาค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 75

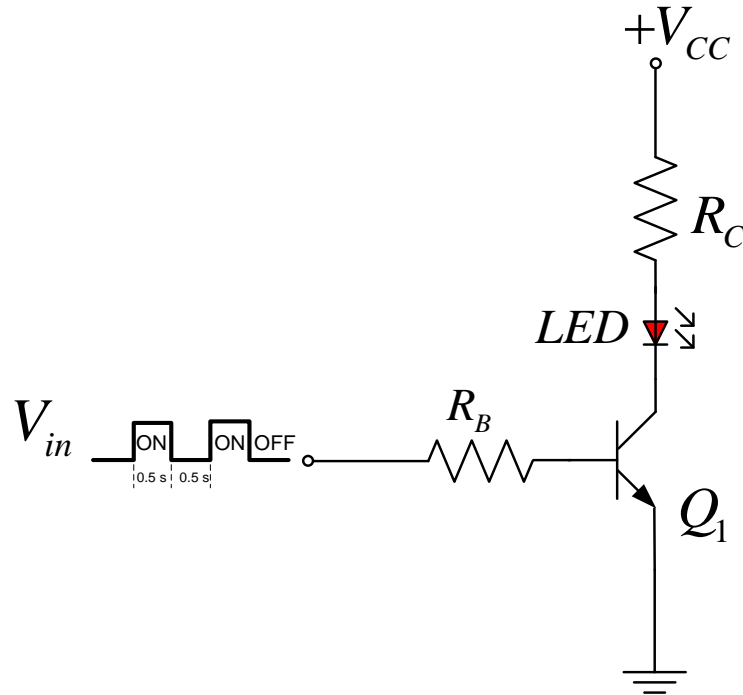
$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{30mA}{75} = 0.4mA$$

7.2.3 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ขาเบส โดยเนื่องจากค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุด 2 เท่า ดังนั้น $I_{B(min)} = 0.8mA$ เพื่อมั่นใจว่าจะสามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังไว้

$$\text{จาก } I_B = \frac{V_{RB}}{R_B} = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} = \frac{V_{in} - 0.7}{3k\Omega}$$

$$V_{in} - 0.7 = 2I_{B(min)}R_B = 0.8mA \times 3k\Omega$$

$$V_{in} = 2.4 + 0.7 = 3.1V$$



รูปที่ 7.4 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ที่ประยุกต์ใช้กับ LED

7.2 การจำลองวงจรถานซิสเตอร์สวิตช์ด้วยโปรแกรม LTspice

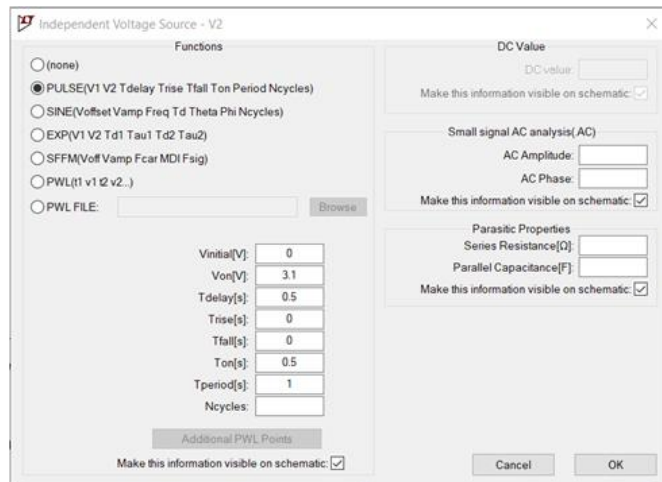
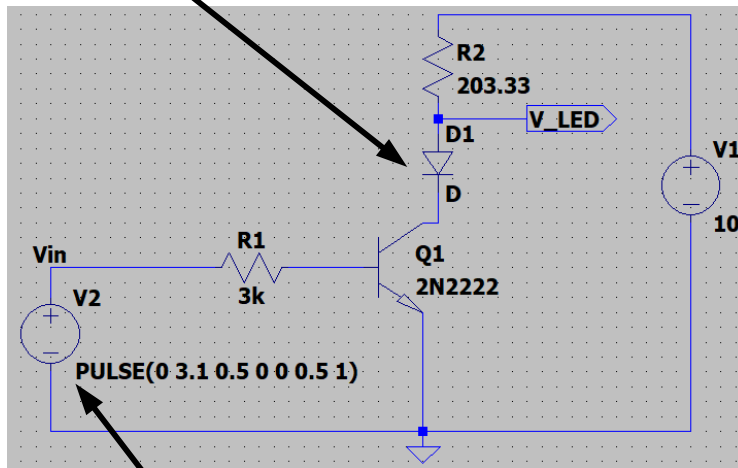
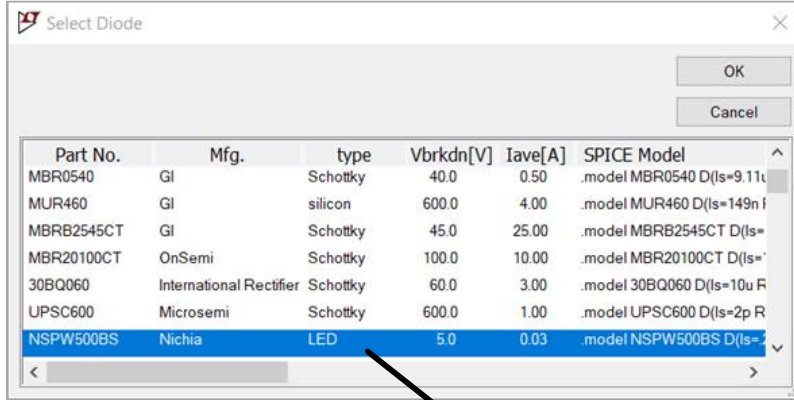
จากตัวอย่างที่ 7.2 เราสามารถใช้โปรแกรม LTspice ช่วยจำลองการทำงานโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

7.2.1 ต่่วงจรดังรูปที่ 7.5 โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งมีค่าอัตราขยายกระแส $\beta_{DC} = 75$

7.2.2 เลือกไดโอดโดยการคลิกขวาที่อุปกรณ์ จากนั้นเลือกชนิด LED เบอร์ NSPW500BS ซึ่งมีแรงดันไบแอสตรงที่ประมาณ 3.6 V และกระแสขณะทำงานประมาณ 30 mA

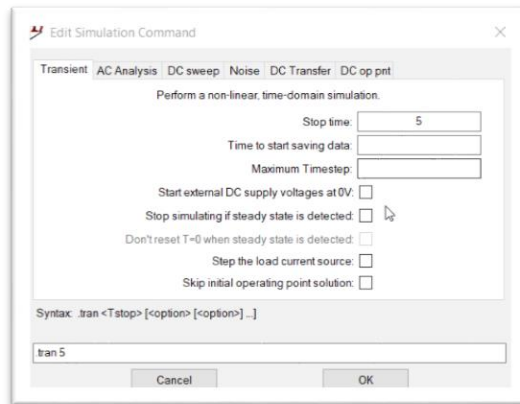
7.2.3 สัญญาณอินพุตฝั่งขาเข้าเลือกเป็นชนิดพัลส์ ความถี่ 1 Hz โดยใช้ค่าแอมพลิจูดจากการพิจารณาในตัวอย่างที่

7.2

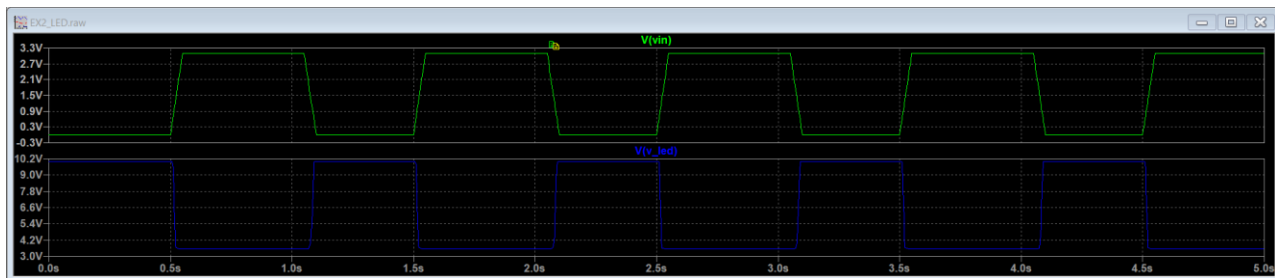


รูปที่ 7.5 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ที่ประยุกต์ใช้กับ LED โดยใช้ LTspice จำลองการทำงาน

7.2.4 ทำการจำลองการทำงานโดยเลือกการจำลองแบบ Transient และเลือกค่า Stop time = 5



7.2.5 ทำการจำลองและเลือกดูสัญญาณ V_{in} และ $V(V_led)$ โดยแสดงอยู่ Plot pane ต่างกัน

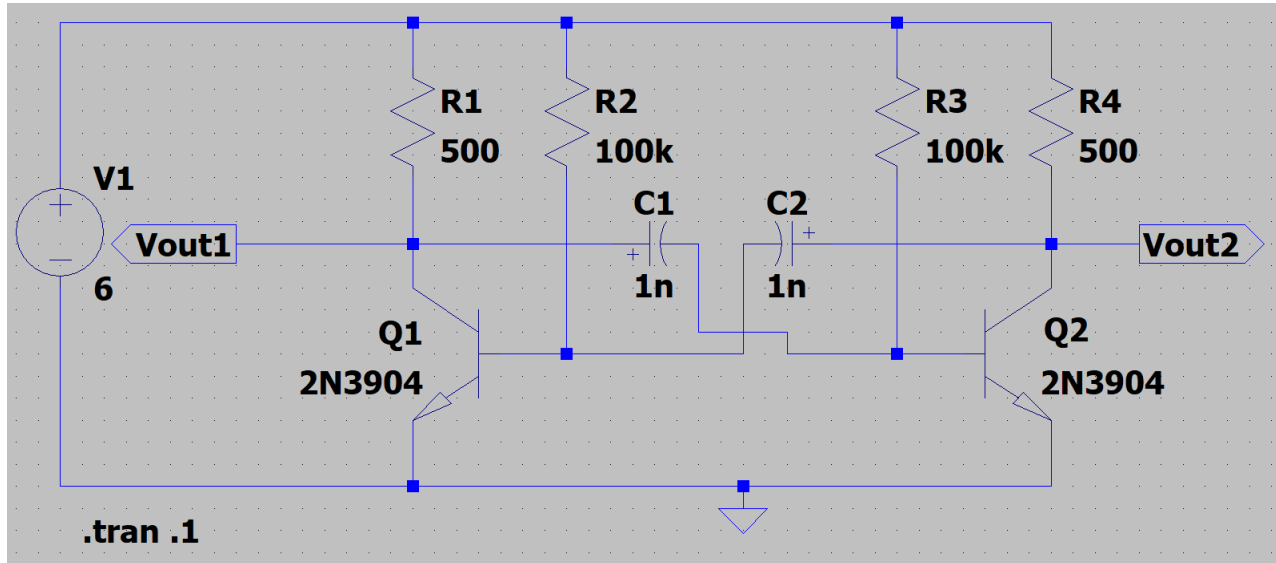


7.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

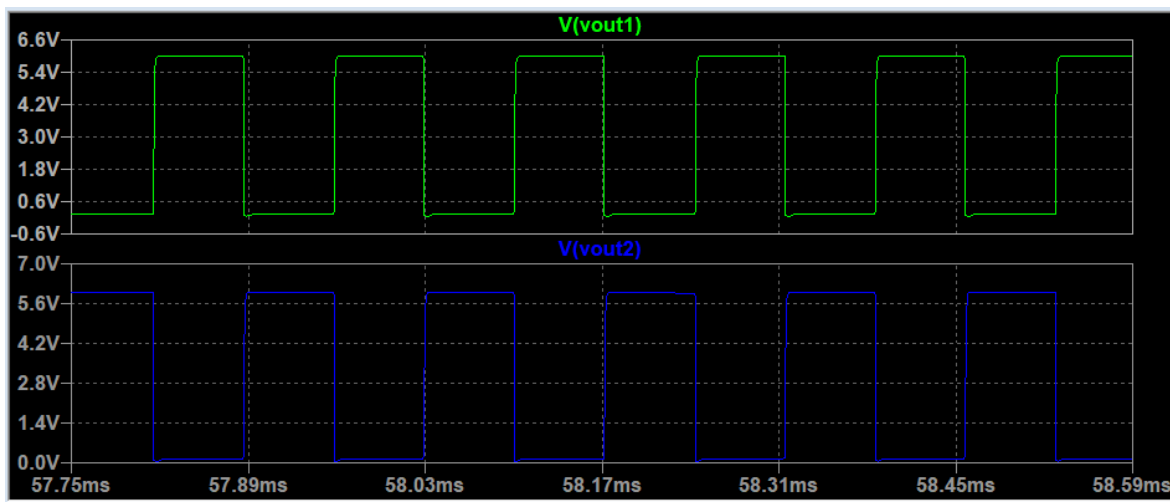
7.3.1 วงจรออสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator)

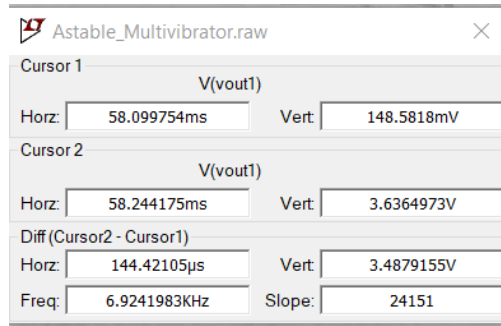
ออสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) จะทำหน้าที่เหมือนวงจรกำเนิดความถี่สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง ทำหน้าที่คล้ายวงจรกำเนิดความถี่คือตัวมันเองสามารถทำงานและหยุดทำงานสลับกันตลอดเวลาหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ฟรีรันนิ่งมัลติไวเบรเตอร์ (Free running multivibrator) การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้คร่าวๆดังนี้ จากวงจรในรูปที่ 7.6 ทรานซิสเตอร์สองตัวเชื่อมต่อแบบไขว้กันในลักษณะที่วงจรทำงานสลับไปมาระหว่างสองสถานะ ในสถานะหนึ่งขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 จะได้รับการไบแอสไปข้างหน้าทำให้กระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ON และทำงานอยู่ในโหมดอิ่มตัว ทำให้กระแสไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ซึ่งส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ให้ต่ำลงและ C_1 เริ่มเข้าสู่สถานะการคายประจุส่วนทรานซิสเตอร์ Q_2 อยู่ในสถานะ OFF เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เบสไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการไบแอสตรงที่ขาเบสไปขาอิมิตเตอร์ เมื่อกระแสที่ขาคอลเล็กเตอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ไหลผ่าน C_1 แรงดันไฟฟ้าที่ขาเบสของ Q_2 จะเพิ่มขึ้นจนกว่าจะสูงพอที่จะทรานซิสเตอร์ Q_2 เข้าสู่ภาวะ ON และทำงานอยู่ใน

โหมดอิมพัลส์ ทำให้กระแสไหลผ่านชาคอลลีคเตอร์ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ชาคอลลีคเตอร์ลดลง ด้านขวาของ C_2 ลดลง แต่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวมันไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ลดลง ต่ำเมื่อเทียบกับกราวด์และเข้าสู่สภาวะ OFF จากนั้นจะได้อีกครั้งหนึ่งของวัฏจักรโดยมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 และจะดำเนินต่อไปจนกว่าทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเข้าสู่สภาวะ ON จากนั้นวงจรจะวนซ้ำเป็นวัฏจักรแบบนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 7.6 วงจรอะตะเบิลมัลติไวเบรเตอร์ โดยจำลองผ่านโปรแกรม LTspice





รูปที่ 7.7 ผลการจำลองผ่านโปรแกรม LTspice

สัญญาณที่ได้จากวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.8 เราสามารถกำหนดค่า T ได้จากสมการที่ 7.8

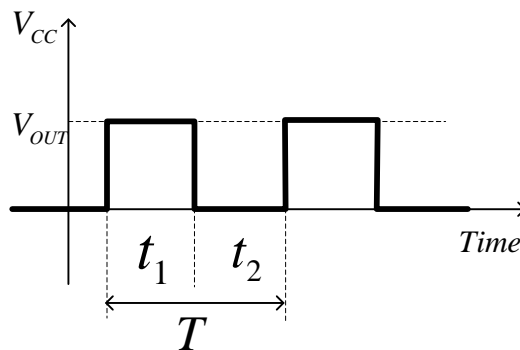
$$t_1 = 0.69C_1R_2 \quad (7.6)$$

$$t_2 = 0.69C_2R_3 \quad (7.7)$$

$$T = 0.69(C_1R_2 + C_2R_3) \quad (7.8)$$

ถ้า $C_1 = C_2$ และ $R_2 = R_3$ เราสามารถคำนวณหาค่าความถี่ f ได้จากสมการที่ 7.9

$$f = \frac{1}{1.38RC} \quad (7.9)$$

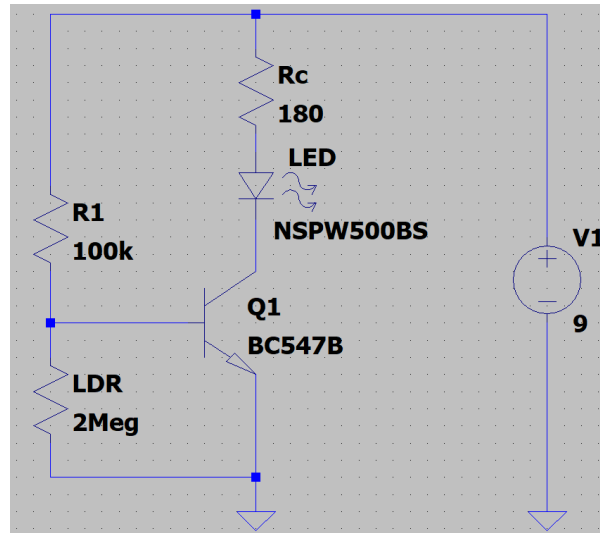


รูปที่ 7.8 สัญญาณพัลส์ในอุดมคติที่ได้จากวงจรอะเสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator)

7.3.2 วงจรเปิดไฟตอนกลางคืนอัตโนมัติ

โดยจากวงจรในรูปที่ 7.9 ตัวต้านทานไวแสง LDR (Light Dependent Resistor) เป็นตัวต้านทานที่ค่าความต้านทาน จะเปลี่ยนไปตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบลงบนตัวต้านทาน บางครั้งเรียกว่าโฟโตริซิสเตอร์ (Photo Resistor) หรือโฟโตคอนดักเตอร์ (Photo Conductor) ซึ่งถ้ามีแสงตกกระทบบค่าความต้านทานจะมีค่าประมาณ 7.5

$k\Omega$ แต่เมื่อไม่มีแสงค่าความต้านทานจะมีค่าสูงมากประมาณมากกว่า $1\text{ M}\Omega$ นำมาต่อเป็นวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน เมื่อไม่มีแสงทำให้แรงดันที่ขาเบสสูงกว่าแรงดันที่ขาเบสมาอิมิตเตอร์ $V_B > V_{BE(ON)}$ ทำให้ทรานซิสเตอร์ ON เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว ทำให้มีกระแสไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ไปยังขาอิมิตเตอร์ ทำให้หลอด LED หรือหลอดไฟสว่างขึ้น



รูปที่ 7.9 วงจรเปิดไฟตอนกลางคืนอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

1. Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992
2. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
3. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.
4. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/11551/ONSEMI/BC547.html>
5. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15077/PHILIPS/2N3904.html>
6. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1093983/ISC/2N3906.html>
7. https://www.tutorialspoint.com/pulse_circuits/pulse_circuits_astable_multivibrator.htm

ใบงานที่ 7. การใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

วัตถุประสงค์

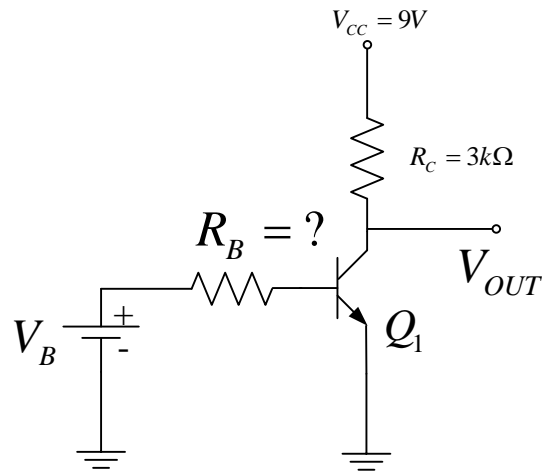
- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของการทำงานของการใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์
- 1.2 เพื่อศึกษาการคำนวณ การจำลอง และการทดลองจริงของวงจรการใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของวงจรการใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์และสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII ที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว สามารถดาวน์โหลดจาก
Link : <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
3. ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 2 ตัว
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
5. แอมป์มิเตอร์ 2 ตัว
6. โวลต์มิเตอร์
7. ออสซิลโลสโคป
8. ตัวต้านทาน $3\text{k}\Omega$, $5\text{k}\Omega$ ตัวต้านทานปรับค่าได้
9. อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ (Function Generator)
10. ไดโอดเปล่งแสง LED

การทดลองที่ 7.1 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ (ดูแนวทางจากตัวอย่างที่ 7.1)

- จงหาค่า V_{CE} เมื่อ $V_B = 0V$
- ค่ากระแสที่คอลเล็กเตอร์ขณะทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะอิ่มตัว $I_{C(sat)} = ?$
- ค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 300 (โดยละทิ้งค่า $V_{CE(sat)}$)
- คำนวณหาค่าตัวต้านทานที่ขาเบส $R_{B(max)}$ เมื่อ $V_B = 3.3V$



รูปที่ 7.10 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันโดยมีการต่อ R_E ร่วมด้วย

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลองการทำงานใช้ ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904	วัดจริงใช้ ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904
V_{CE}			
$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C}$			
$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE}}$			
$R_{B(max)}$			

ถ้าเราใช้ R_B ไม่เหมาะสมจะส่งผลอย่างไรต่อการใช้งานทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

.....

.....

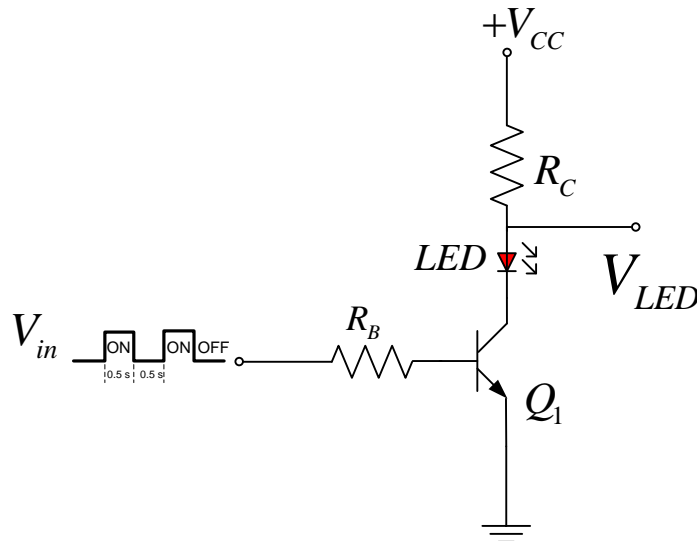
.....

การทดลองที่ 7.2 จากวงจรในรูปที่ 7.11 จงหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ โดยกำหนดให้ $V_{CC} = 6V$, $V_{CE(sat)} = 0.1V$, $\beta_{DC} = 300$, $V_{LED} = 3.6V$, $I_{LED(max)} = 30mA$, $R_B = 5k\Omega$

7.2.1 คำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_C ที่เหมาะสม

7.2.2 คำนวณหาค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะอิ่มตัว ถ้าอัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 300 (สำหรับการจำลองให้ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904)

7.2.3 คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ขาเบส โดยต้องมั่นใจว่าสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวได้โดยเมื่อจากค่ากระแสเบสที่น้อยที่สุด 2 เท่า เพื่อมั่นใจว่าจะสามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังไว้

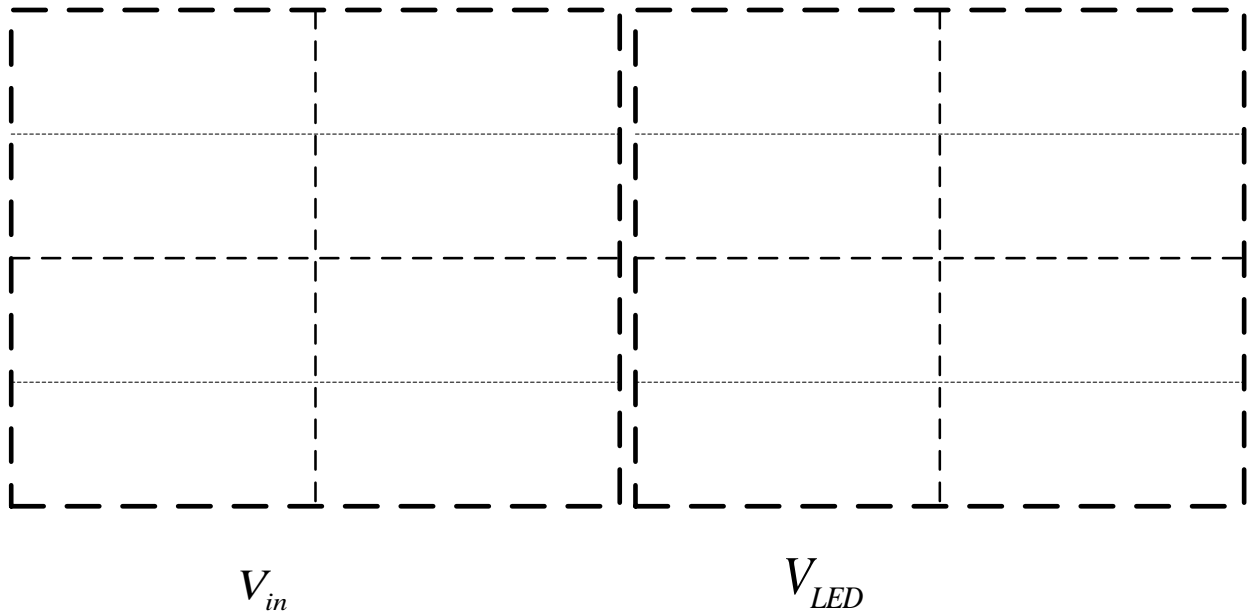


รูปที่ 7.11 วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ที่ประยุกต์ใช้กับ LED

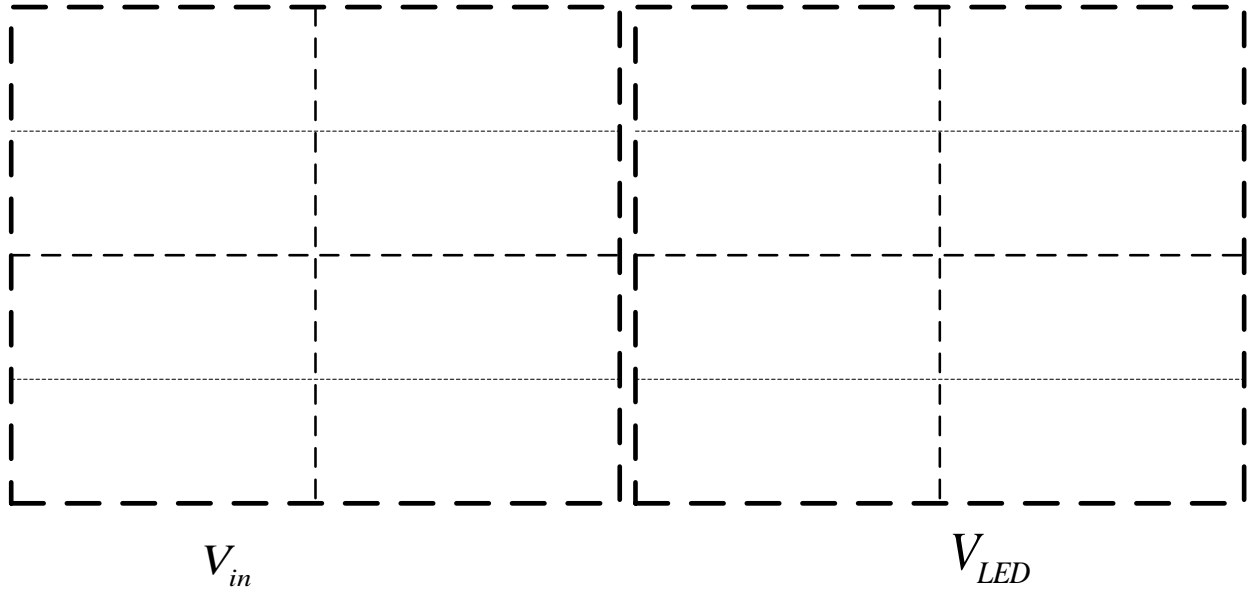
พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลองการทำงานใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904	วัดจริงใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904
R_C			
$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{I_{C(sat)}}{h_{FE}}$			

<p>จาก $I_B = \frac{V_{RB}}{R_B} = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B}$</p> <p>ดังนั้น $V_{in} - 0.7 = 2I_{B(\min)}R_B$</p>			
---	--	--	--

7.2.4 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 7.11 โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{LED} โดยสัญญาณที่ป้อนเป็นสัญญาณพัลส์ ความถี่ 3 Hz โดยใช้ค่าแอมพลิจูดจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 7.2.3



7.2.5 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 7.11 โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{LED} โดยสัญญาณที่ป้อนเป็นสัญญาณพัลส์ ความถี่ 3 Hz โดยใช้ค่าแอมพลิจูดจากการพิจารณาในหัวข้อที่ 7.2.3



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

การทดลองที่ 7.3 จากวงจรที่ 7.12 ถ้าเราอยากให้งจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 1.5 kHz จงคำนวณหาค่า C_1, C_2 และ R_2, R_3 จากแนวทางการคำนวณในหัวข้อที่ 7.3.1 และแสดงรูปสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม LTspice และทำการทดลองจริง

แสดงวิธีการคำนวณ

C_1, C_2

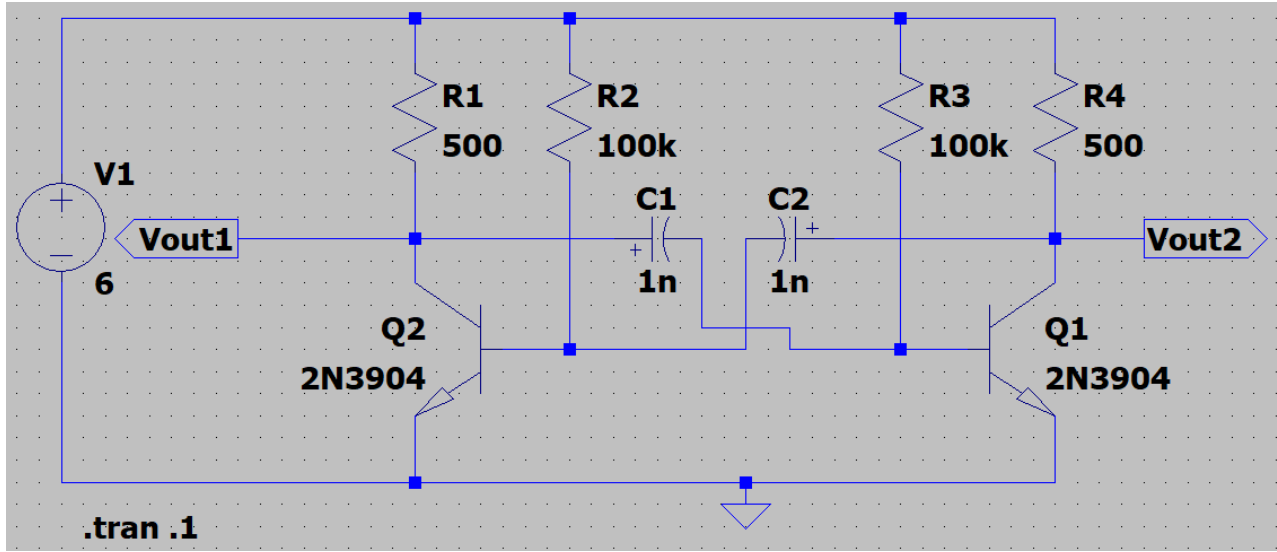
.....

.....

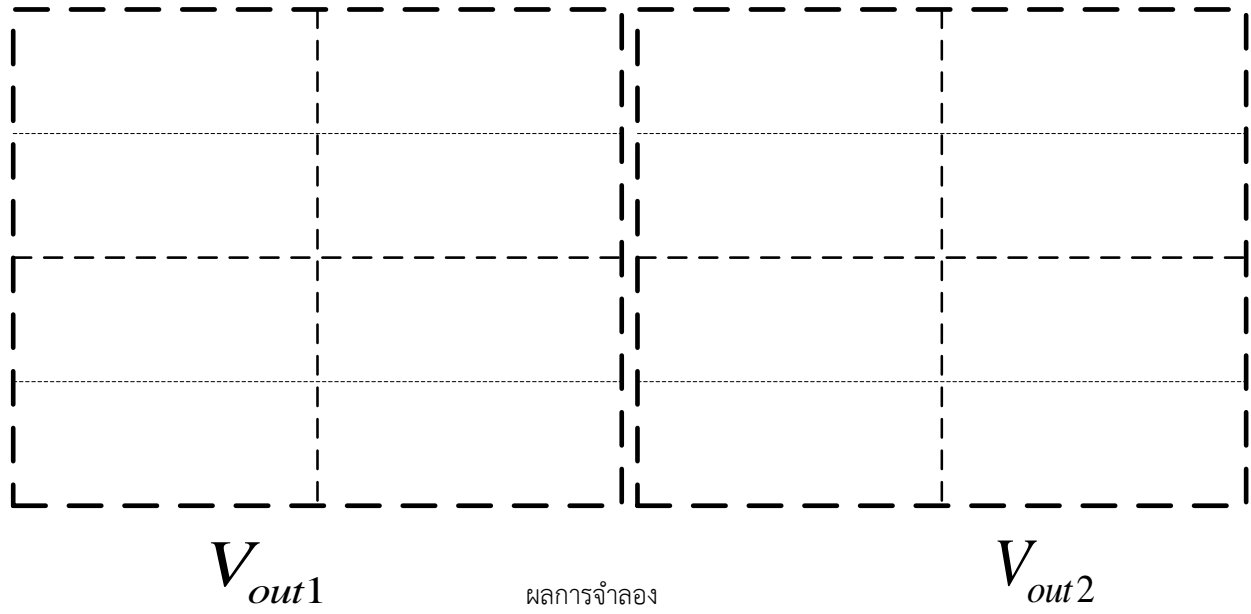
R_2, R_3

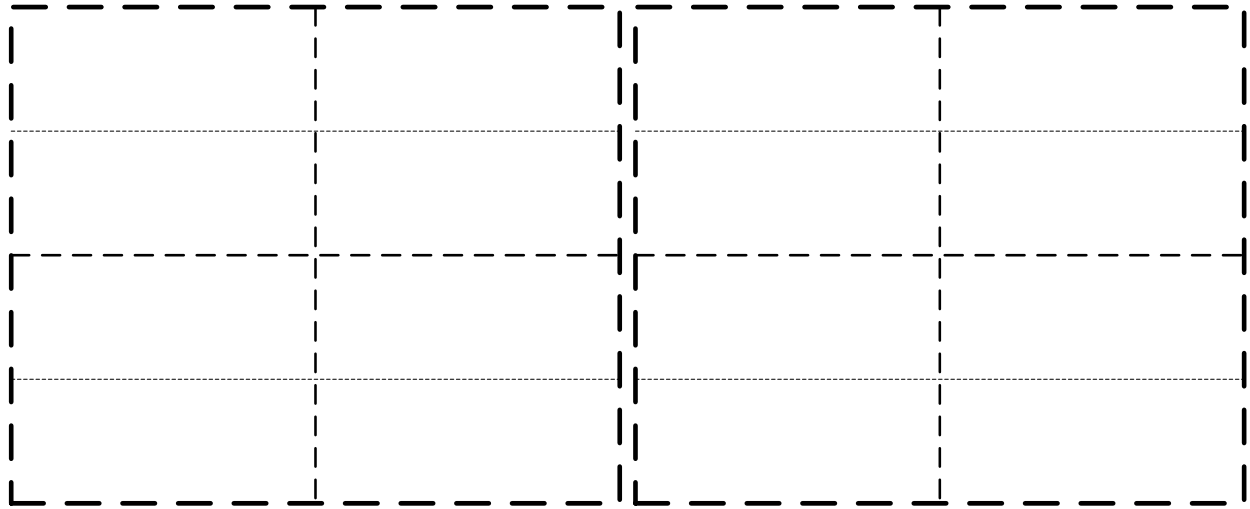
.....

.....



รูปที่ 7.12 วงจรอะแสะเตเบิลิลต์ติไวเบรเตอร์ โดยจำลองผ่านโปรแกรม LTspice





V_{out1}

ผลการทดลองจริง

V_{out2}

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

บทที่ 8 ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า

8.1 ประวัติของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า Field Effect Transistor (FET)

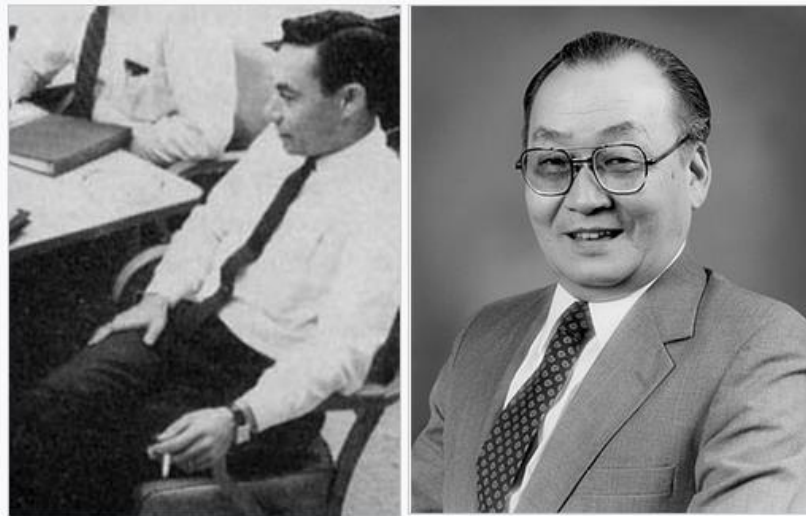
ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อ (BJT) อาศัยประจุสองประเภทร่วมกันคืออิเล็กตรอนอิสระและโฮล ซึ่งเป็นสาเหตุที่เรียกว่าไบโพลาร์ซึ่งคำว่า “bi” ย่อมาจาก “two” หรือสองนั่นเอง ส่วนในบทนี้จะกล่าวถึงทรานซิสเตอร์อีกแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่าทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า Field Effect Transistor (FET) ประเภทของอุปกรณ์เป็นแบบขั้วเดียว unipolar เนื่องจากการทำงานขึ้นอยู่กับประจุเพียงชนิดเดียวไม่ว่าจะเป็นอิเล็กตรอนอิสระหรือโฮล กล่าวคือ FET มีพาหะข้างมาก (Majority Carrier) แต่ไม่มีพาหะข้างน้อย (Minority Carrier) สำหรับการใช้งานเชิงเส้นส่วนใหญ่ ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อ (BJT) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก แต่ก็มีแอปพลิเคชันเชิงเส้นบางตัวที่ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ดีกว่าเนื่องจากคุณสมบัติของมันที่มีความต้านทานอินพุตสูง และคุณสมบัติอื่น ๆ นอกจากนี้ FET ยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรสวิตซ์ เนื่องจากไม่มีพาหะข้างน้อย (Minority Carrier) ใน FET ส่งผลให้สามารถเปิดปิดสวิตซ์ได้เร็วขึ้นเนื่องจากไม่มีการเก็บประจุที่จะต้องตัดออกออกจากบริเวณรอยต่อของทรานซิสเตอร์นั่นเอง ทรานซิสเตอร์แบบยูนิโพลาร์มีสองชนิดคือ เจเฟต Junction field-effect transistor JFET และ มอสเฟต metal-oxide semiconductor FET (MOSFET) ผู้ที่เสนอแนวคิดของ FET เป็นคนแรกของโลกคือ Julius Edgar Lilienfeld เสนอแนวคิดของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า Field-Effect ในปี พ.ศ. 2468 (ค.ศ. 1925) ดังแสดงในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 Julius Edgar Lilienfeld เสนอแนวคิดของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า Field-Effect ในปี พ.ศ. 2468 (ค.ศ. 1925)

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect_transistor

และกลุ่มผู้คิดค้น MOSFET ได้เป็นคนแรกของโลกคือ Mohamed Atalla และ Dawon Kahng ได้คิดค้น MOSFET (MOS field-effect transistor) ในปี พ. ศ. 2502 (ค.ศ.1959)ดังแสดงในรูปที่ 8.2

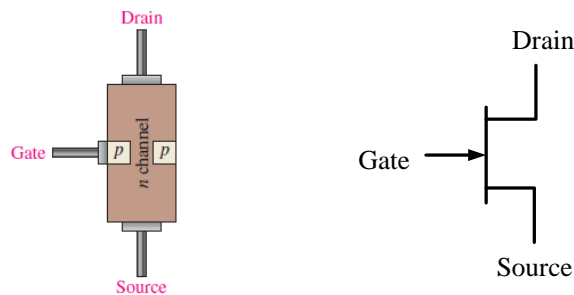


รูปที่ 8.2 Mohamed Atalla (ซ้าย) และ Dawon Kahng (ขวา) ได้คิดค้น MOSFET (MOS field-effect transistor) ในปี พ. ศ. 2502 (ค.ศ.1959)

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Field-effect_transistor

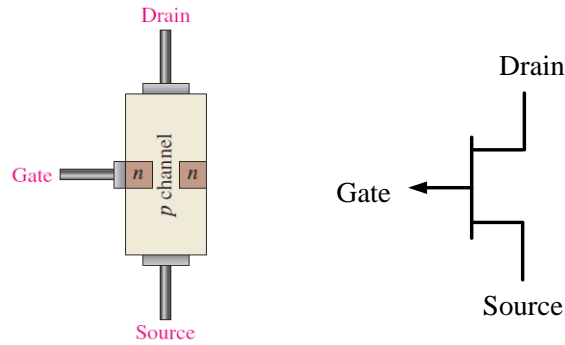
8.2 ทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET

เจเฟตถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด N – Channel และ P – Channel แต่ทั้ง 2 ชนิด จะมี 3 ขาเหมือนกัน คือ ขาซอส (Source ; S) ขาเดรน (Drain ; D) และขาเกต (Gate ; G) ดังแสดงในรูปที่ 8.3 และ 8.4 เจเฟตจะประกอบด้วยชั้นสารซิลิกอน N ซึ่งได้รับการแพร่ลงบนรอยต่อของชั้นสารพีและเอ็น



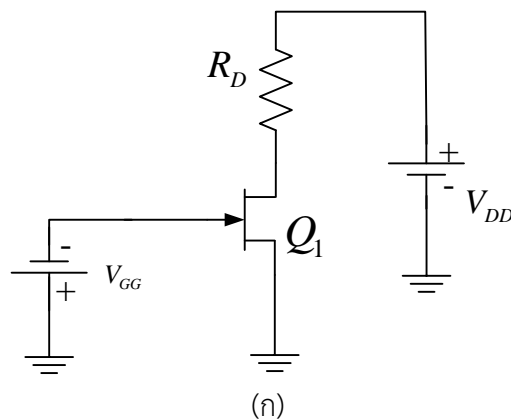
รูปที่ 8.3 ตัวอย่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET ชนิด N

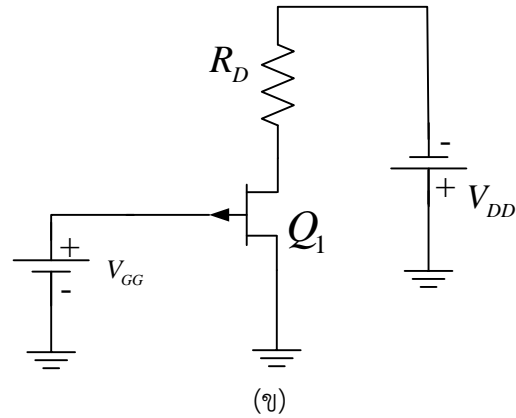
ที่มา: Thomas L. Floyd



รูปที่ 8.4 ตัวอย่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET ชนิด P
ที่มา: Thomas L. Floyd

เจเฟตจะทำงานได้โดยป้อนแรงดันไบแอสที่เดรนและซอส(กรณี N-channel JFET) โดยแหล่งจ่าย V_{DD} ให้ขั้วบวกกับเดรนและขั้วลบกับซอส สำหรับเกตของเจเฟตจะให้ไบแอสกลับ โดยเจเฟตชนิด n-channel จะมีเกตเป็น p ดังนั้นแรงดันไบแอสที่เกต V_{GG} ต้องให้ขั้วลบกับเกตและขั้วบวกกับซอส ดังรูปที่ 8.5(ก) การทำงานของเจเฟตนั้นเมื่อให้ไบแอสกลับที่เกต ($V_{GS} = V_{GG}$) ดังรูปที่ 8.5(ก) จะเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ PN จำนวนหนึ่งทำให้ช่องทางเดินของกระแสในสาร n(n-channel) ระหว่างเดรนกับซอสแคบลง กระแสเดรน (I_D) จะไหลจากเดรนไปสู่ซอสได้จำนวนหนึ่งถ้าปรับค่าแรงดัน V_{GS} ให้มีค่าไบแอสกลับมานี้ ผลคือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีปริมาณมากขึ้นทำให้ช่องทางเดินกระแสแคบลง เป็นผลให้กระแสเดรน (I_D) มีปริมาณลดลง แต่ถ้าปรับค่าแรงดัน V_{GG} ให้มีค่าไบแอสน้อยลงจะทำให้ช่องทางเดินของกระแสระหว่างเดรนกับซอสมีขนาดกว้างขึ้นทำให้กระแสเดรน (I_D) ไหลได้มากขึ้น แสดงว่าสามารถควบคุมปริมาณกระแสเดรนที่ไหลผ่านเจเฟตได้โดยการควบคุมแรงดันไบแอสกลับที่เกตของเจเฟต การทำงานของเจเฟตชนิด p-channel ก็จะทำงาในลักษณะเดียวกันเพียงแต่แหล่งจ่ายแรงดันจะสลับขั้วกัน ดังแสดงในรูป 8.5 (ข)



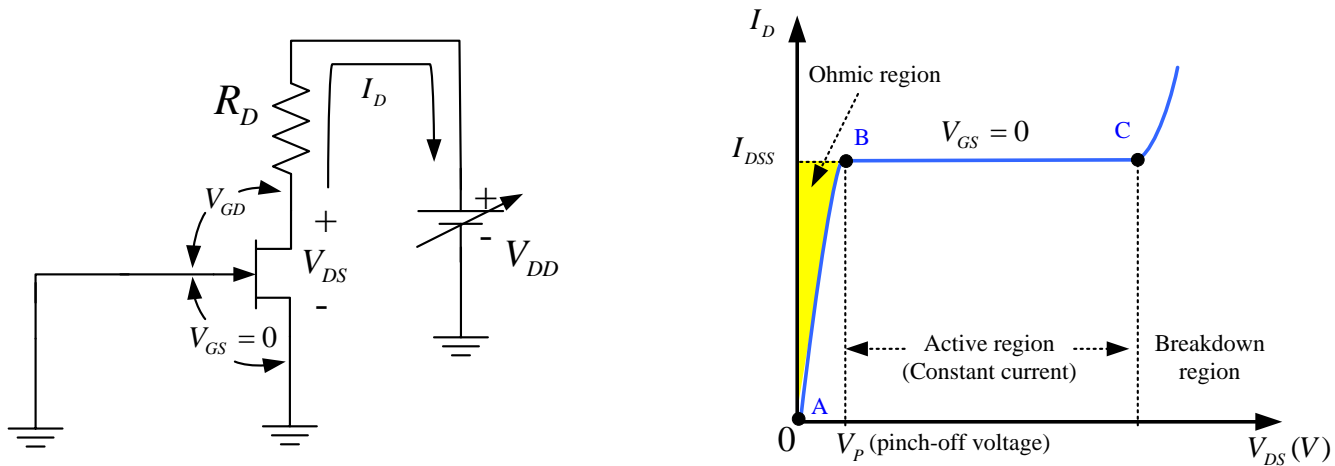


รูปที่ 8.5 (ก) การไบแอสเบื้องต้นสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET ชนิด N
(ข) การไบแอสเบื้องต้นสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET ชนิด P

8.3 คุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบเจเฟต (JFET)

8.3.1 กราฟคุณลักษณะของขาเดรน

การทำงานของของเจเฟต JFET คือการไหลของกระแส Drain ผ่านช่อง channel จะขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสระหว่างขาเกตกับซอส V_{GS} ในกรณีของ Junction FET นี้ปริมาณของกระแส I_D จะถูกควบคุมด้วยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ของรอยต่อ P-N ซึ่งแรงดันไบแอส V_{GS} จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 8.6 วงจรที่ใช้ทดสอบหากราฟคุณลักษณะ(ซ้าย)
จุดทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(ขวา)

จากรูปที่ 8.6 แสดงจุดทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET สามารถแบ่งออกได้ไป 3 ย่านดังต่อไปนี้

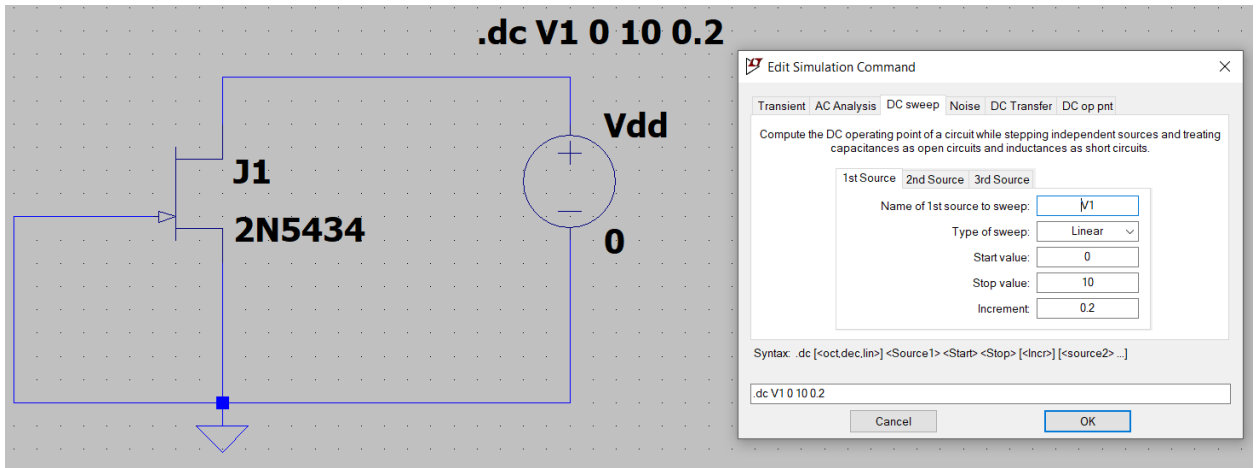
1. ย่านโอห์มมิก (Ohmic region) จุด A ไปยังจุด B พิจารณาในกรณีที่ยังไม่มีไบแอสใดๆให้กับเกตและซอส ($V_{GS} = 0$) ดังในรูปที่ 8.6 ในขณะที่ศักดา V_{DS} มีค่าน้อยๆความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ Depletion Region ก็จะมีควมกว้างไม่มาก ความต้านทานของ channel จะมีค่าต่ำกระแสไหลได้อย่างสะดวกในขณะนี้ที่ channel ซึ่งเปรียบเสมือนมีตัวต้านทานค่าค่าหนึ่งต่ออยู่ และเมื่อเพิ่ม V_{DS} ขึ้นกระแสก็จะไหลได้มากขึ้น

2. ย่านแอ็คทีฟ (Active region) ซึ่งเริ่มทำงานที่ค่าแรงดัน V_p Pinch-Off Voltage (จุด B) ไปยังจุด C บนกราฟการทำงานในย่านนี้ในขณะที่เพิ่ม V_{DS} ขึ้นไปอีก Reverse Bias ที่ Junction ได้รับจะมากขึ้น Depletion Region กว้างมากขึ้นทำให้ความต้านทานของ channel เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจะเพิ่มแรงดัน V_{DS} แต่กระแส I_D จะไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป (Constant current) กระแส I_D จะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ในขณะที่ $V_{GS} = 0$ นี้เรียก I_{DSS} หรือ I_{DO} (Drain saturation current) ซึ่งเป็น Parameter ที่สำคัญตัวหนึ่งของ FET

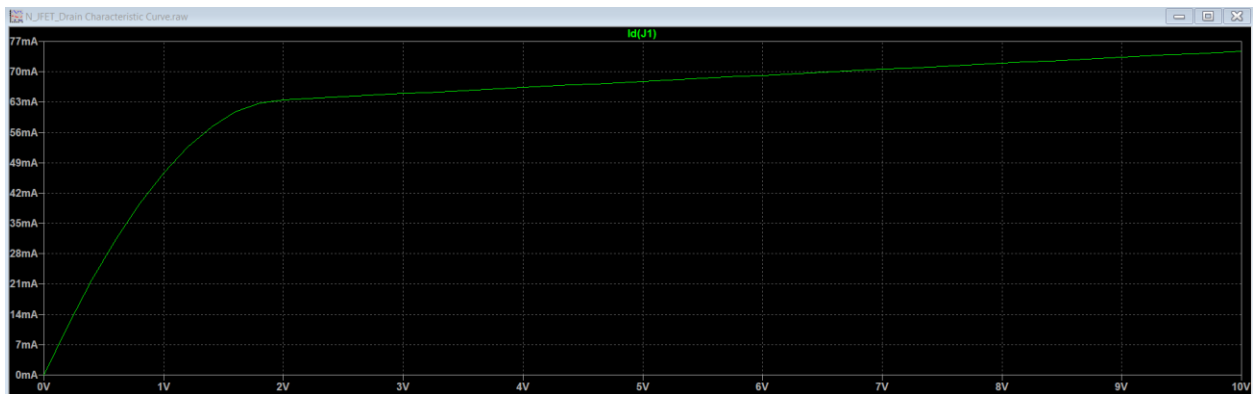
3. ย่านพังทลาย (Breakdown region) จะเกิดขึ้นที่จุด C เมื่อ I_D เริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับ V_{DS} ที่เพิ่มขึ้นอีก การ Breakdown อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์แบบถาวรได้ ดังนั้น JFET จึงทำงานต่ำกว่าจุดพังทลายและอยู่ภายในย่านแอ็คทีฟ (Active region) (กระแสคงที่) (ระหว่างจุด B และ C บนกราฟ)

การใช้โปรแกรมจำลองหากกราฟคุณลักษณะของชาเดรน

รูปที่ 8.7 แสดงตัวอย่างการหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ JFET N-Channel เบอร์ 2N5434 ด้วย LTspice โดยใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{DD} หรือ V_{DS} จาก 0 V -10 V โดยใช้ Step ของการปรับที่ละ 0.2 V



(ก)

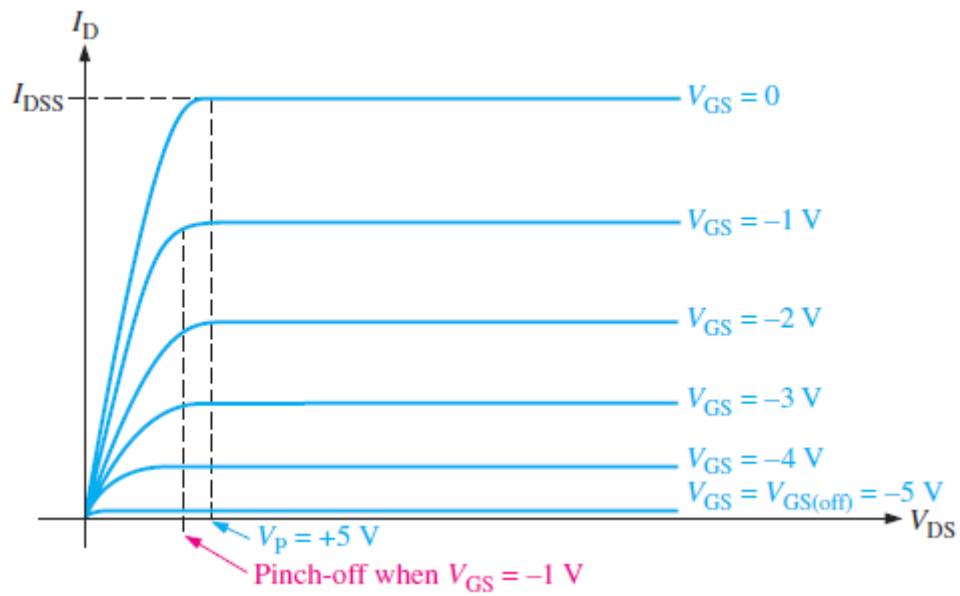
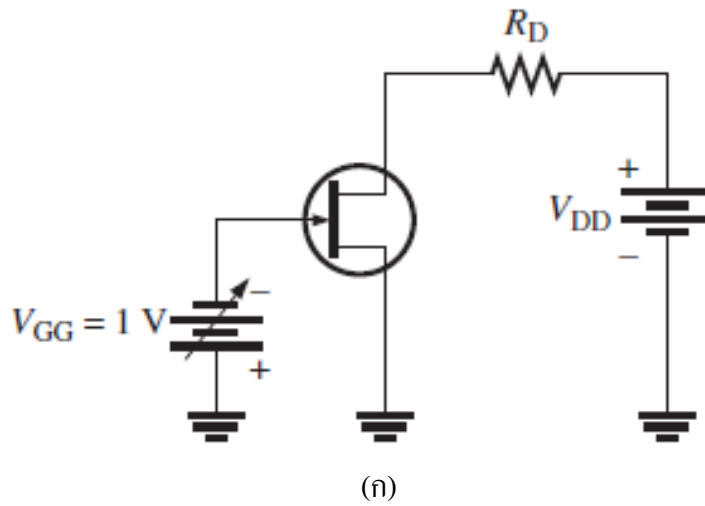


(ข)

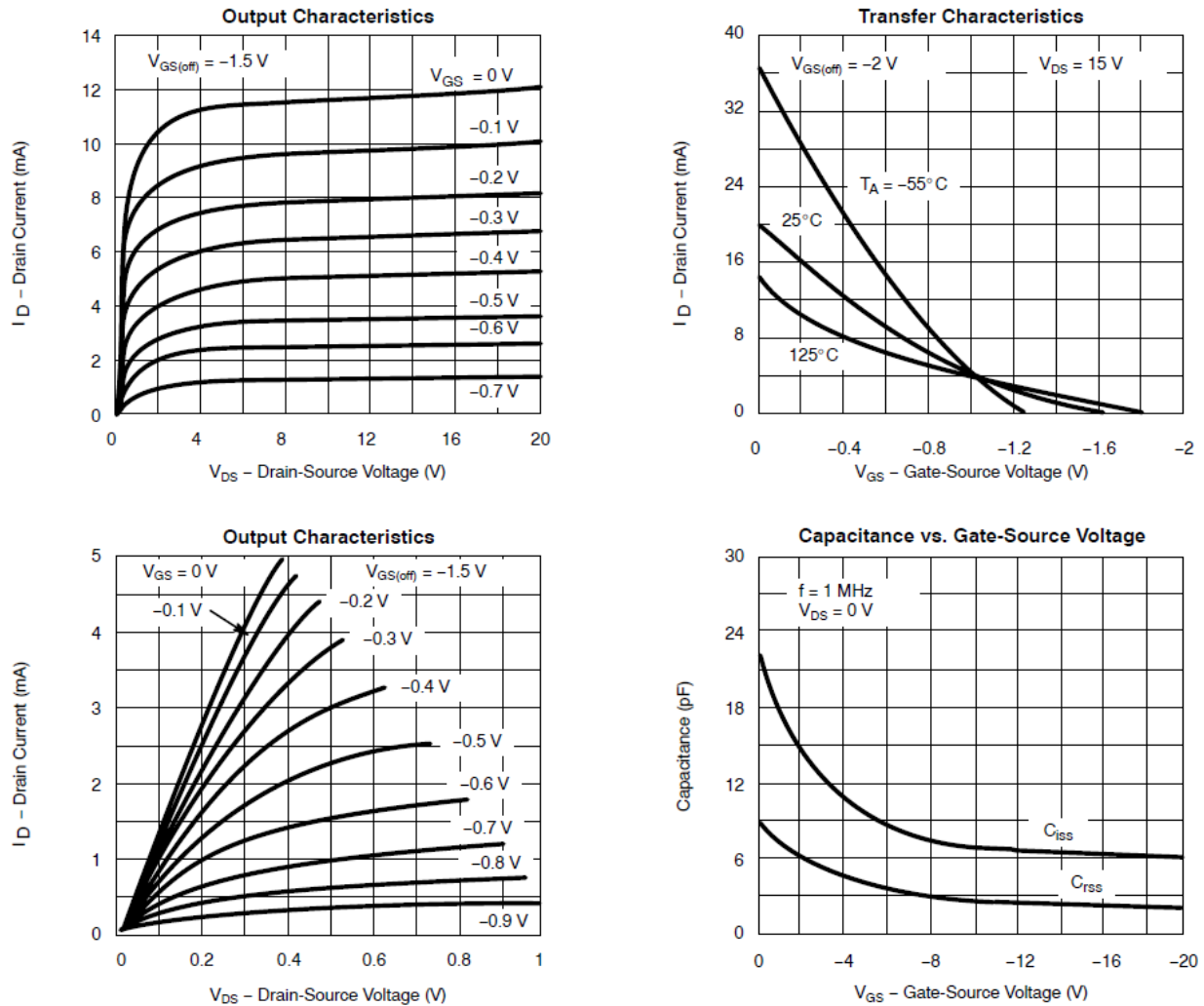
รูปที่ 8.7 ตัวอย่างการหาค่าคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์แบบ JFET เบอร์ 2N5434 ด้วย LTspice (ก) วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข) เส้นกราฟคุณลักษณะ

8.3.2 การใช้แรงดัน V_{GS} ควบคุมกระแสที่ขาเดรน

ที่ขาเกตจากที่เราต่อลงกราวด์เปลี่ยนมาต่อกับแหล่งจ่ายไฟที่ต่อขั้วบวกลงกราวด์และต่อขั้วลบไปยังขาเกต ดังแสดงในรูปที่ 8.8 (ก) ซึ่งเมื่อเราเพิ่มแรงดัน V_{GS} (เป็นลบมากขึ้น) กรณีของ JFET ชนิด N และเป็นบวกมากขึ้น กรณีของ JFET ชนิด P) จะทำให้กระแส I_D ลดลง และเมื่อเราเพิ่มค่า V_{GS} จนทำให้กระแสที่ขาเดรนมีค่าเป็น 0 เราเรียกแรงดันนั้นว่าเป็นแรงดันคัทออฟ $V_{GS(off)}$ ดังแสดงในรูปที่ 8.8 (ข) และพารามิเตอร์นี้จะระบุในคู่มืออุปกรณ์ Datasheet รูปที่ 8.9 แสดงเส้นกราฟแสดงจุดทำงานของ JFET เบอร์ 2N5564



รูปที่ 8.8 (ก)วงจรที่ใช้ทดสอบหากราฟคุณลักษณะ (ข) เส้นกราฟแสดงจุดทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel)
ที่มา:Thomas L. Floyd

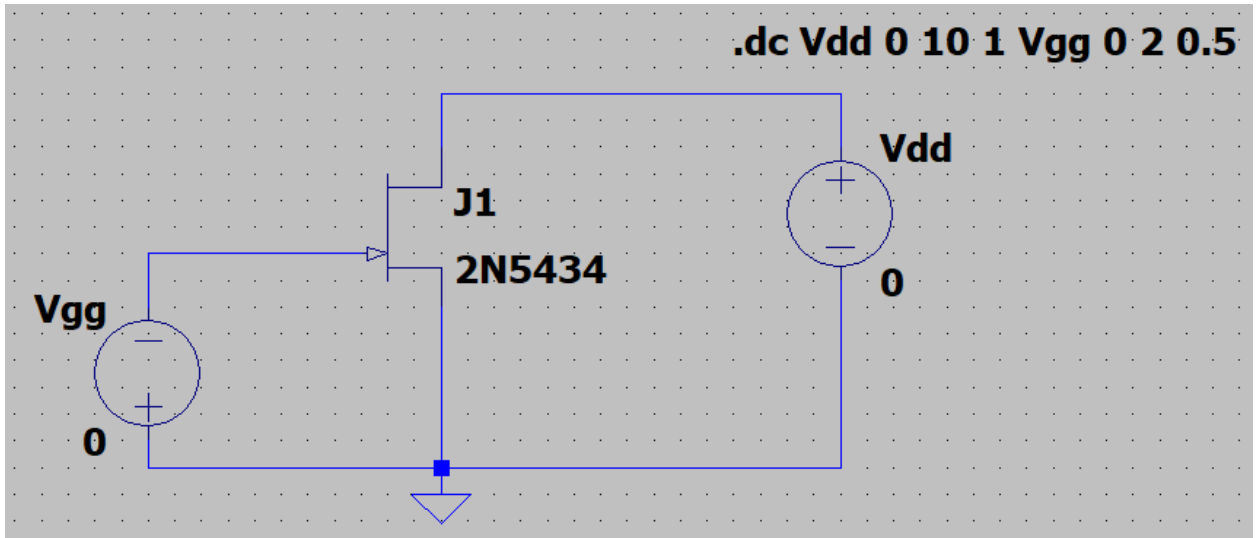


รูปที่ 8.9 แสดงเส้นกราฟแสดงจุดทำงานของ JFET เบอร์ 2N5564

ที่มา: <https://datasheet.octopart.com/2N5564-Vishay-datasheet-40514.pdf>

การใช้โปรแกรมจำลองหากราฟคุณลักษณะของการใช้แรงดัน V_{GS} ควบคุมกระแสที่ขาเดรน

รูปที่ 8.10 แสดงตัวอย่างการหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ JFET N-Channel เบอร์ 2N5434 ด้วย LTspice โดยใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{DD} เป็น 1st Source หรือ V_{DS} จาก 0 V ถึง 10 V โดยใช้ Step ของการปรับที่ละ 1 V และ V_{GG} เป็น 2nd Source หรือ V_{GS} จาก 0 V ถึง 2 V โดยใช้ Step ของการปรับที่ละ 0.5 V



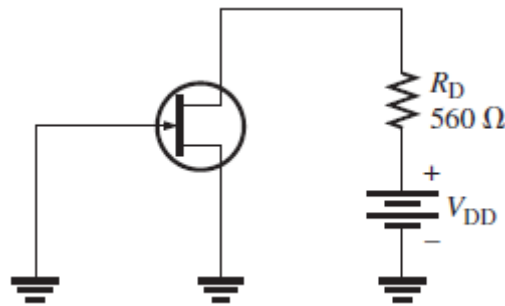
(ก)



(ข)

รูปที่ 8.10 ตัวอย่างการหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์แบบ JFET เบอร์ 2N5434 ด้วย LTspice (ก)วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข) เส้นกราฟคุณลักษณะ

ตัวอย่างที่ 8.1 จงหาค่า V_{DD} ที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ JFET ทำงานที่ในย่านกระแสเดรนคงที่ เมื่อ $V_{GS}=0$ V โดยกำหนดให้ JFET เบอร์ 2N5564 มี $V_{GS(off)} = -2$ V (ค่า Typical) และ $I_{DSS} = 20$ mA.



รูปที่ 8.11 วงจรที่ใช้ทดสอบหาค่า V_{DD} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel)

ที่มา :Thomas L. Floyd

วิธีทำ เนื่องจากค่า $V_{GS(off)} = -2$ V , $V_P = 2$ V ค่า V_{DS} ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ JFET ทำงานที่ในย่านกระแสเดรนคงที่

$$V_{DS} = V_P = 2V \tag{8.1}$$

ในย่านกระแสเดรนคงที่ เมื่อ $V_{GS} = 0$

$$I_D = I_{DSS} = 20mA \tag{8.2}$$

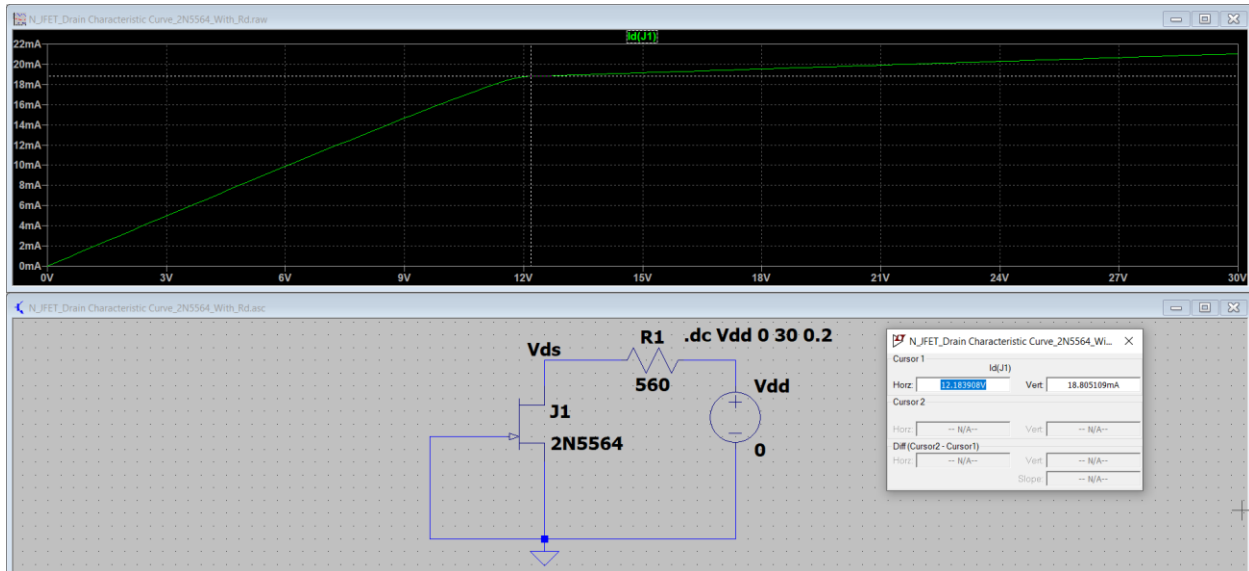
แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ขาเดรนพิจารณาจาก

$$V_{RD} = I_D R_D = 20mA \times 560 = 11.2V \tag{8.3}$$

V_{DD} ที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ JFET ทำงานที่ในย่านกระแสเดรนคงที่ เมื่อ $V_{GS} = 0$ V

$$V_{DD} = V_{DS} + V_{RD} = 11.2 + 2 = 12.2V \tag{8.4}$$

การใช้ LTspice จำลองการทำงานเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของคำตอบ



รูปที่ 8.12 การพิสูจน์ค่าตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า V_{DD} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel)

8.3.3 กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET

กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_D กับแรงดันไบแอส V_{GS} ซึ่งแสดงวิธีการหาไว้แล้วจากหัวข้อที่ผ่านมาแต่มีการเพิ่มข้อมูลของ V_{GS} ลงไปทางกราฟฝั่งซ้ายเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8.13 ซึ่งความสัมพันธ์สามารถพิจารณาจากสมการต่างๆดังต่อไปนี้
กระแสที่ชาเดรน I_D สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8.5

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (8.5ก)$$

หรือ

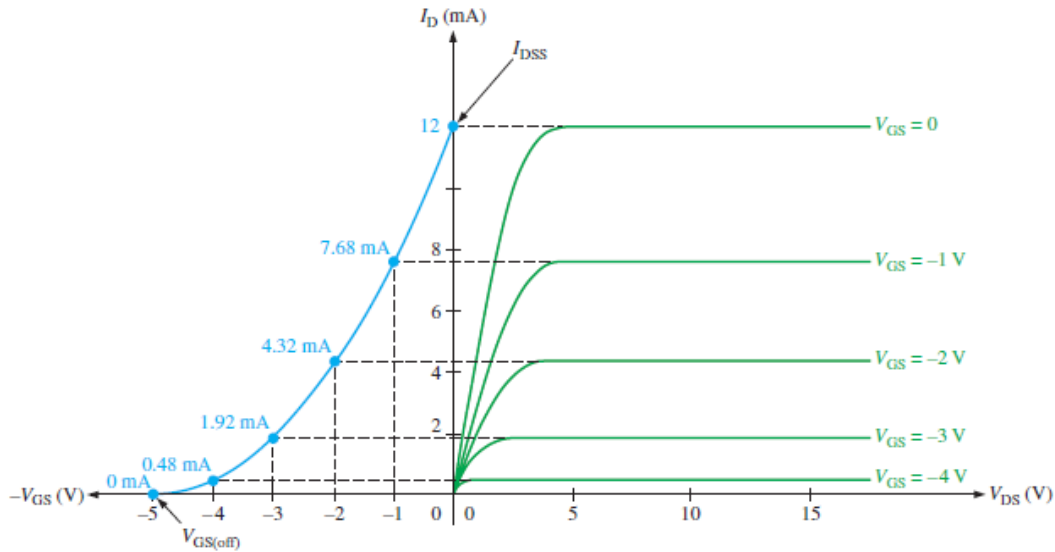
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad (8.5ข)$$

หรือ

$$V_{GS} = V_P \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right) \quad (8.6)$$

โดยที่ I_{DSS} = กระแสเดรนคงที่เมื่อ $V_{GS} = 0$ V (ระบุใน Datasheet)

V_P = แรงดัน Pinch-Off หรือ $V_{GS(off)}$ (ระบุใน Datasheet)



รูปที่ 8.13 กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel) (Thomas L. Floyd)

ตัวอย่างที่ 8.2 จากข้อมูลอุปกรณ์ในรูปที่ 8.14 ของ JFET เบอร์ 2N5564 มี $V_{GS(off)} = -2$ V (ค่า Typical) และ $I_{DSS} = 20$ mA. จงใช้ข้อมูลเหล่านี้หาค่ากระแส I_D ในกรณีที่ $V_{GS} = 0$ V , -0.5 V , -2 V

วิธีทำ กรณีที่ $V_{GS} = 0$

$$I_D = I_{DSS} = 20mA$$

กรณีที่ $V_{GS} = -0.5$ V ใช้สมการที่ 8.5

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = 20mA \left(1 - \frac{-0.5}{-2} \right)^2 = 11.25mA$$

กรณีที่ $V_{GS} = -2$ V ใช้สมการที่ 8.5

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 = 20mA \left(1 - \frac{-2}{-2} \right)^2 = 0mA$$

รูปที่ 8.14 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า I_D ในกรณีที่ $V_{GS} = 0$ V , -0.5 V , -2 V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel)

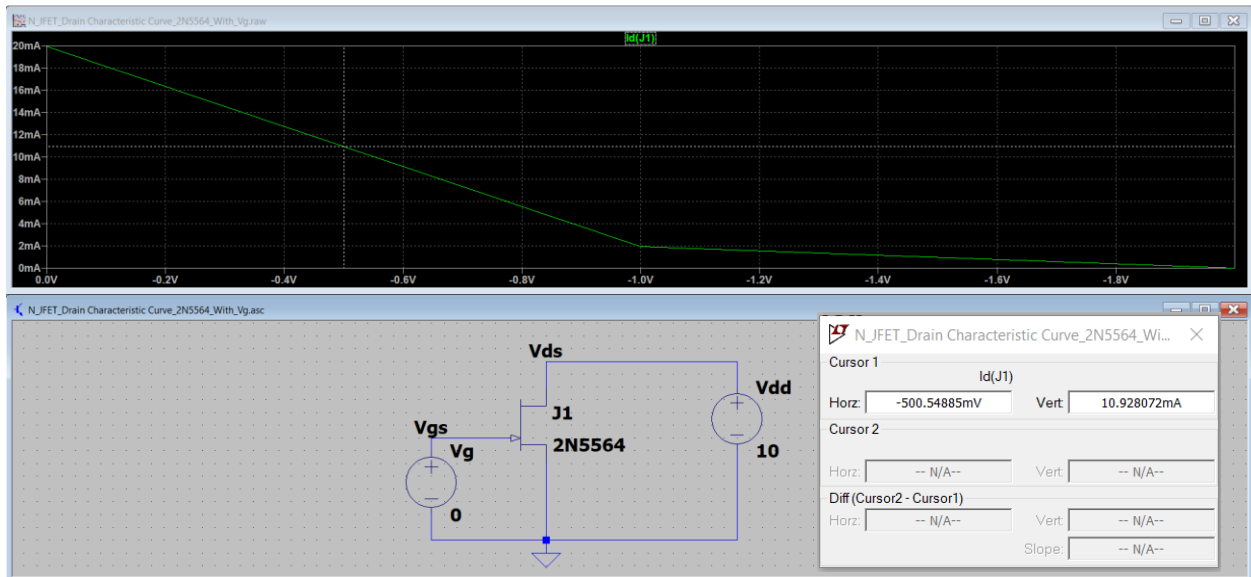
2N5564/5565/5566
Vishay Siliconix



SPECIFICATIONS (T_A = 25 °C UNLESS OTHERWISE NOTED)										
Parameter	Symbol	Test Conditions	Typ ^a	Limits						Unit
				2N5564		2N5565		2N5566		
				Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Static										
Gate-Source Breakdown Voltage	V _{(BR)GSS}	I _G = -1 μA, V _{DS} = 0 V	-55	-40		-40		-40		V
Gate-Source Cutoff Voltage	V _{GS(off)}	V _{DS} = 15 V, I _D = 1 nA	-2	-0.5	-3	-0.5	-3	-0.5	-3	
Saturation Drain Current ^b	I _{DSS}	V _{DS} = 15 V, V _{GS} = 0 V	20	5	30	5	30	5	30	mA
Gate Reverse Current	I _{GSS}	V _{GS} = -20 V, V _{DS} = 0 V	-5		-100		-100		-100	pA
		T _A = 150 °C	-10		-200		-200		-200	nA
Gate Operating Current ^c	I _G	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA	-3							pA
		T _A = 125 °C	-1							nA
Drain-Source On-Resistance	r _{DS(on)}	V _{GS} = 0 V, I _D = 1 mA	50		100		100		100	Ω
Gate-Source Voltage ^c	V _{GS}	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA	-1.2							V
Gate-Source Forward Voltage	V _{GS(F)}	I _G = 2 mA, V _{DS} = 0 V	0.7		1		1		1	
Dynamic										
Common-Source Forward Transconductance	g _{fs}	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA f = 1 kHz	9	7.5	12.5	7.5	12.5	7.5	12.5	mS
Common-Source Output Conductance	g _{os}		35		45		45		45	μS
Common-Source Forward Transconductance ^d	g _{fs}	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA f = 100 MHz	8.5	7		7		7		mS
Common-Source Input Capacitance	C _{iss}	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA f = 1 MHz	10		12		12		12	pF
Common-Source Reverse Transfer Capacitance	C _{rss}		2.5		3		3		3	
Equivalent Input Noise Voltage	\bar{e}_n	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA f = 10 Hz	12		50		50		50	nV/ √Hz
Noise Figure	NF	R _G = 10 MΩ			1		1		1	dB
Matching										
Differential Gate-Source Voltage	V _{GS1} - V _{GS2}	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA			5		10		20	mV
Gate-Source Voltage Differential Change with Temperature	$\frac{\Delta V_{GS1} - V_{GS2} }{\Delta T}$	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA T _A = -55 to 125 °C			10		25		50	μV/ °C
Saturation Drain Current Ratio ^c	$\frac{I_{DSS1}}{I_{DSS2}}$	V _{DS} = 15 V, V _{GS} = 0 V	0.98	0.95	1	0.95	1	0.95	1	
Transconductance Ratio	$\frac{g_{fs1}}{g_{fs2}}$	V _{DS} = 15 V, I _D = 2 mA f = 1 kHz	0.98	0.95	1	0.90	1	0.90	1	
Common Mode Rejection Ratio ^c	CMRR	V _{DS} = 10 to 20 V I _D = 2 mA	76							dB

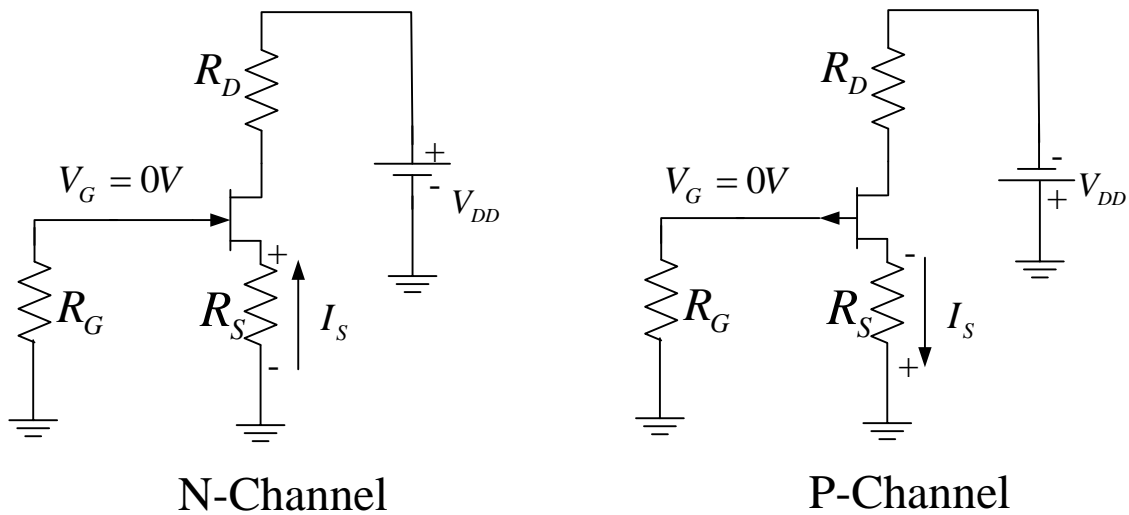
รูปที่ 8.14 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่สำคัญของ JFET เบอร์ 2N5564

(ที่มา: <https://datasheet.octopart.com/2N5564-Vishay-datasheet-40514.pdf>)



รูปที่ 8.15 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า I_D กรณีที่ $V_{GS} = -0.5$ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเจเฟต JFET(N-Channel)

8.3.4 การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิด JFET แบบไบแอสตัวเอง (Self-biased JFET)



รูปที่ 8.16 การจัดไบแอสตัวเองให้กับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า JFET ชนิด N จากรูปที่ 8.16 (ซ้าย) กรณีของ JFET ชนิด N กระแสของซอส I_S สร้างแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_S และเนื่องจาก $I_S = I_D$ ดังนั้นแรงดันจากขาเกตไปขาซอสสามารถหาได้จากสมการที่ 8.7

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R_S \quad (8.7)$$

ดังนั้น

$$V_{GS} = -I_D R_S \quad (8.8)$$

จากรูปที่ 8.16 (ขวา) กรณีของ JFET ชนิด P แรงดันจากขาเกตไปขาซอสสามารถหาได้จากสมการที่ 8.9

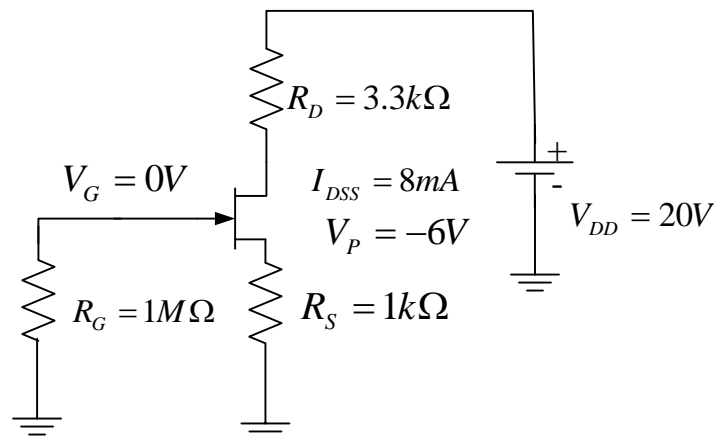
$$V_{GS} = I_D R_S \quad (8.9)$$

จากรูปที่ 8.16 (ขวา) กรณีของ JFET ชนิด N

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D \quad (8.10)$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) \quad (8.11)$$

ตัวอย่างที่ 8.3 จากวงจรรูปที่ 8.17 จงหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ $V_{GS_Q}, I_{D_Q}, V_{DS}, V_S, V_G, V_D$



รูปที่ 8.17 ตัวอย่างที่ 8.3

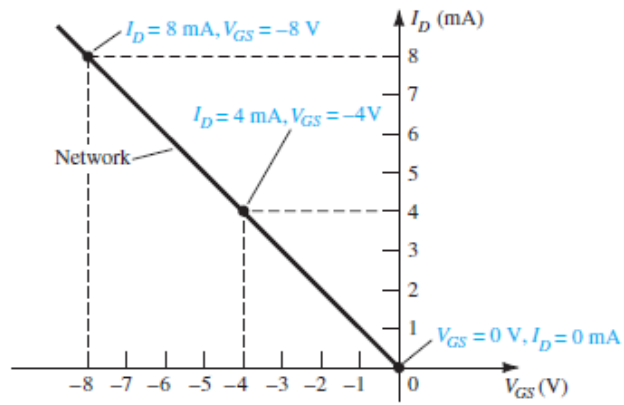
วิธีทำ

1. $V_{GS_Q} = -I_D R_S$ เลือกค่า $I_D = 4mA$

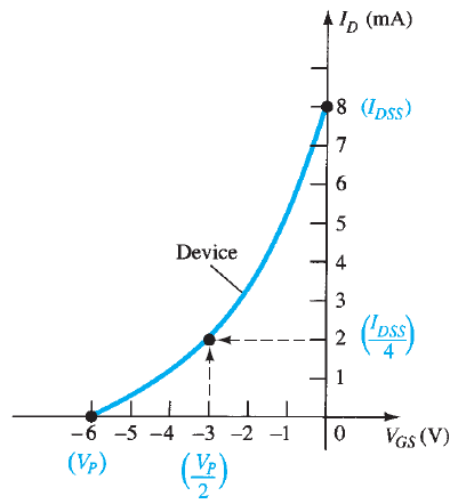
$$V_{GS} = -(4mA)(1k\Omega) = -4V$$

ผลการคำนวณสามารถพล็อตได้ดังแสดงในรูปที่ 8.18(ก) ถ้าเราเลือกค่า $I_D = 8mA$ จะทำให้แรงดัน $V_{GS} = -8V$ สำหรับสมการ Shockley's equation ถ้าเราเลือก $V_{GS} = V_P / 2 = -3V$ เราสามารถหาค่า $I_D = I_{DSS} / 4 = 8mA / 4 = 2mA$ ซึ่งสามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 8.18(ข) และถ้าเราเส้นกราฟที่ได้จากรูปที่ 8.18(ก) แทนลงในรูปที่ 8.18(ข) เราจะได้จุดตัดดังรูปที่ 8.18(ค) และถ้าเราวาดภาพฉายลงมาตัดกับแกนนอนจะหาได้ค่า $V_{GS_Q} = 2.6V$

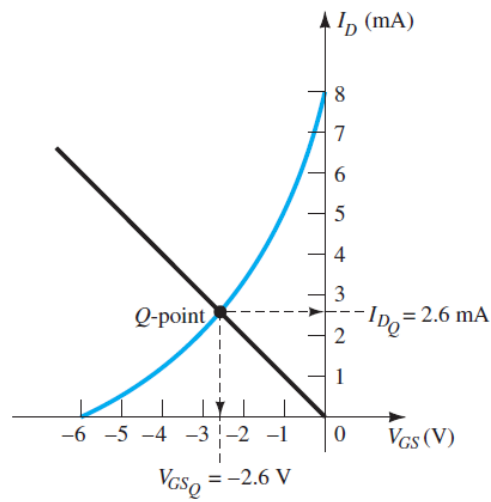
2. ที่จุด Q-point $I_{D_Q} = 2.6mA$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8.18 (ก) กราฟของการไบแอสตัวเองในตัวอย่างที่ 8.3(ข)กราฟคุณลักษณะของ JFET

(ค) พิจารณาจุด Q-point

(Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky)

$$3. V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_S + R_D)$$

$$V_{DS} = 20V - (2.6mA)(1k\Omega + 3.3k\Omega) = 8.82V$$

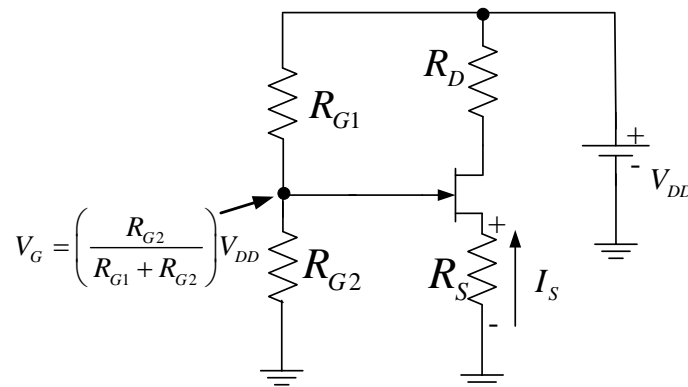
$$4. V_S = I_S R_S = (2mA)(1k\Omega) = 2.6V$$

$$5. V_G = 0V$$

$$6. V_D = V_{DS} + V_S = 8.82V + 2.6V = 11.42V$$

$$\text{หรือ } V_D = V_{DD} - I_D R_D = 20V - 2.6mA \times 3.3k\Omega = 11.42V$$

8.3.5 การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิด JFET แบบไบแอสแบ่งแรงดัน (Voltage divider-biased JFET)



N-Channel

รูปที่ 8.19 การจัดไบแอสแบบแบ่งแรงดันให้กับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า JFET ชนิด N

จากรูปที่ 8.19 กรณีของ JFET ชนิด N กระแสของซอส I_S สร้างแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_S และเนื่องจาก $I_S = I_D$ ดังนั้นแรงดันจากขาเกตไปขาซอสสามารถหาได้จากสมการที่ 8.14

$$V_S = I_D R_S \tag{8.12}$$

$$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD} \tag{8.13}$$

แรงดันจากขาเกตไปขาซอสสามารถหาได้จาก

$$V_{GS} = V_G - V_S \quad (8.14)$$

จากแรงดันที่ขาซอส

$$V_S = V_G - V_{GS} \quad (8.15)$$

กระแสที่ขาเดรนสามารถหาได้จาก

$$I_D = \frac{V_S}{R_S} \quad (8.16)$$

แทนค่า V_S จากสมการที่ 8.15

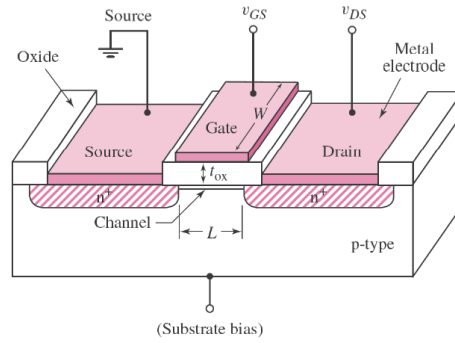
$$I_D = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S} \quad (8.17)$$

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์กันของพารามิเตอร์ที่สำคัญระหว่าง JFET กับ BJT

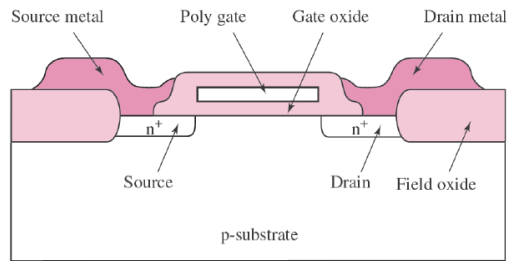
ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ BJT	ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า JFET
$I_C = \beta I_B$	$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$
$I_C \cong I_E$	$I_S = I_D$
$V_{BE} \cong 0.7V$	$I_G = 0A$

8.4 มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: MOSFET)

ในเอกสารประกอบการสอนนี้จะกล่าวถึงมอสเฟตชนิด E-MOSFET (The Enhancement-Mode MOSFET) เท่านั้นซึ่งมอสเฟตชนิดนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเช่น วงจรเครื่องขยายเสียง งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และวงจรความถี่สูง อิมอสเฟต(E-MOSFET)แบบเซนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐาน p ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิคอน ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับบริเวณที่มีการกระตุ้น n โดยผ่านวัสดุผิวนอกที่เป็นโลหะ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกฐาน p เข้ากับแหล่งจ่ายจึง มีขั้ว (Substrate bias) เพิ่มขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 8.20(ก) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าไม่มีเส้นทางเชื่อมหรือไม่มีแชนแนล (no-channel) ระหว่างบริเวณที่มีการกระตุ้น n ทั้ง 2 แห่ง



(ก)



(ข)

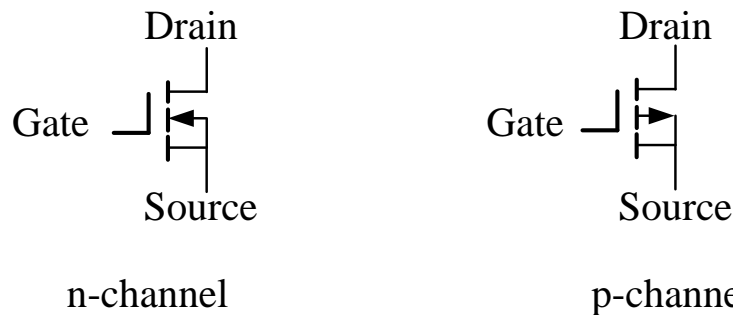
รูปที่ 8.20 โครงสร้างของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์มีนที่ชนิดเอ็น Enhancement-Mode

MOSFET, N-type (ก) ภาพวาด 3 มิติ และ (ข) ภาพตัดขวาง

(Donald A. Neamen)

8.5 ทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET

มอสเฟตถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด N - Channel และ P - Channel แต่ทั้ง 2 ชนิด จะมี 3 ขาเหมือนกัน คือ ขาซอส (Source ; S) ขาเดรน (Drain ; D) และขาเกต (Gate ; G) ดังแสดงในรูปที่ 8.21



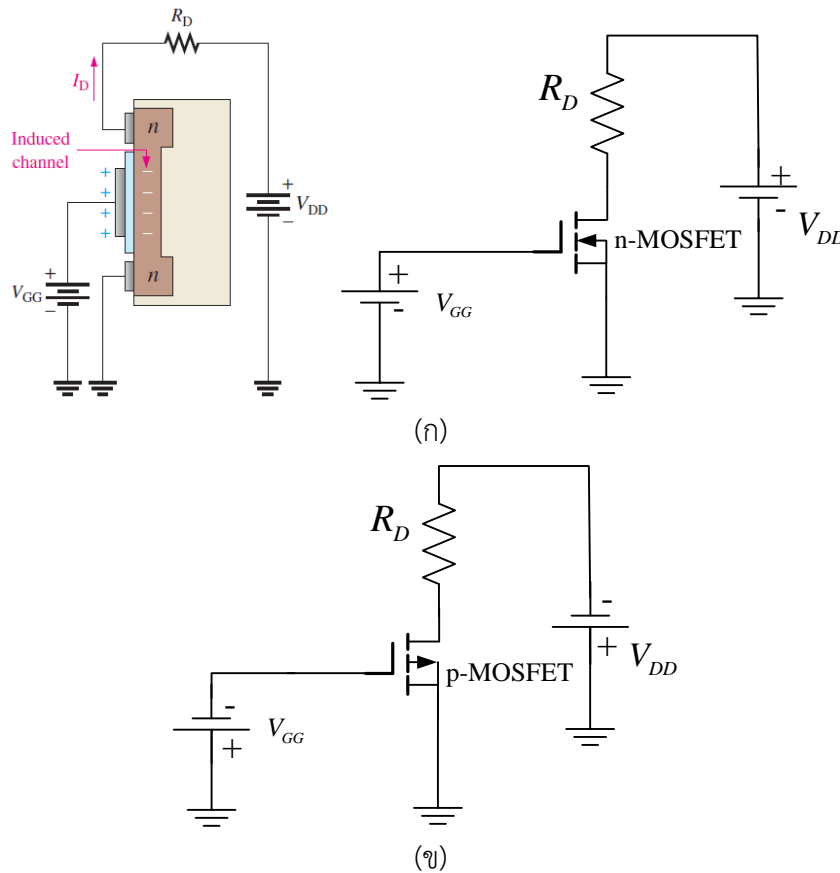
n-channel

p-channel

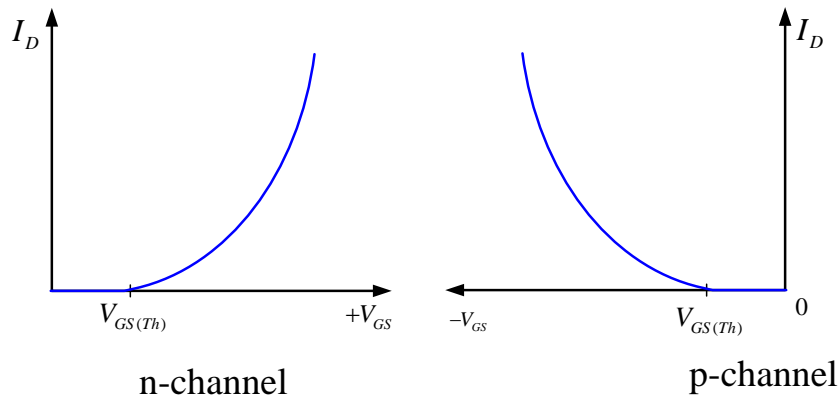
รูปที่ 8.21 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET ชนิด N(รูปซ้าย) และ MOSFET ชนิด P (รูปขวา)

มอสเฟตจะทำงานได้โดยป้อนแรงดันไบแอสที่เกตและซอส(กรณี N-channel MOSFET) โดยแหล่งจ่าย V_{DD} ให้ ขั้วบวกกับเกตและขั้วลบกับซอส สำหรับเกตของมอสเฟตจะให้ไบแอสตรง โดยมอสเฟตชนิด n-channel จะมีเกตเป็น p ดังนั้นแรงดันไบแอสที่เกต V_{GG} ต้องให้ขั้วบวกกับเกตและขั้วลบกับซอส ดังรูปที่ 8.22(ก) การทำงานของมอสเฟตนั้นเมื่อให้ไบแอสกลับที่เกต ($V_{GS} > V_{GS(th)}$) ถ้าจ่าย V_{DS} และ V_{GS} ที่มีค่าเป็นบวกดังรูป ทำให้ขั้ว D และขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกการที่ขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกนี้จะผลักดันให้โฮลในผลึกฐาน p เข้าไปสู่บริเวณภายในผลึกฐาน p และดึงดูดอิเล็กตรอนในผลึกฐาน p (เป็น พาหะข้างน้อยรวมตัว อยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของแผ่นตัวนำ Silicon dioxide SiO_2 ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นฉนวนและป้องกันอิเล็กตรอนไม่ให้ดึงดูด ไปยังขั้วเกต ขณะที่ V_{GS} เพิ่มขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนใกล้กับชั้นของ SiO_2 ก็เพิ่มมากขึ้นตามลำดับขณะเดียวกันบริเวณที่มีการกระตุ้น n เกิดการเหนี่ยวนำจากแรงดัน V_{GS} ทำให้มีอิเล็กตรอนหรือ I_D (มีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน)ไหลระหว่าง ขั้ว D กับขั้ว S

ระดับ V_{GS} ทำให้ I_D ไหลเราเรียกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้า(Threshold Voltage) ในสเปคกำหนดให้ V_T เป็น $V_{GS(th)}$ การทำงานของมอสเฟตชนิด p-channel ก็จะทำงาในลักษณะเดียวกันเพียงแต่แหล่งจ่ายแรงดันจะสลับขั้วกัน ดังแสดงในรูป 8.22 (ข)



รูปที่ 8.22 (ก)การไบแอสเบื้องต้นสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET ชนิด N (Thomas L. Floyd) (ข)การไบแอสเบื้องต้นสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET ชนิด P



รูปที่ 8.23 กราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET ชนิด N(รูปด้านซ้าย) และชนิด P (รูปด้านขวา)

สมการของกราฟลักษณะสมบัติถ่ายโอนทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET จะแตกต่างจากของ JFET ซึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นตรงจุดแรงดันเกตเกิดไปซอส $V_{GS(th)}$ ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแสที่ชาเตรนได้จากสมการที่ 8.18 และค่า Forward Transconductance K_n สามารถหาได้จากสมการที่ 8.19

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(th)})^2 \quad (8.18)$$

$$K_n = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS} - V_{GS(th)})^2} \quad (8.19ก)$$

ซึ่งค่า Forward Transconductance $K_{n,p}$ สามารถพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_{n,p} = \frac{1}{2} \mu_{n,p} C_{ox} \frac{W}{L} \quad (8.19ข)$$

โดย

$\mu_{n,p}$ = สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) ($cm^2 / V - sec$)

C_{ox} = ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Oxide Capacitance) (F / cm^2)

W = ความกว้างของช่องมอสเฟต (Channel width of MOSFET)(units of cm)

L = ความยาวของช่องมอสเฟต (Channel length of MOSFET)(cm)

ทั้งนี้ค่า Forward Transconductance $K_{n,p}$ ยังระบุในคู่มืออุปกรณ์(Datasheet) ดังแสดงในรูปที่ 8.23 โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น g_{FS}

ON CHARACTERISTICS (Note 1)							
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 1 \text{ mA}$	2N7000	0.8	2.1	3	V
		$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250 \mu\text{A}$	2N7002 NDS7002A	1	2.1	2.5	
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-Resistance	$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	2N7000		1.2	5	Ω
		$T_J = 125^\circ\text{C}$			1.9	9	
		$V_{GS} = 4.5 \text{ V}, I_D = 75 \text{ mA}$		1.8	5.3		
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	2N7002	1.2	7.5		
		$T_J = 100^\circ\text{C}$		1.7	13.5		
		$V_{GS} = 5.0 \text{ V}, I_D = 50 \text{ mA}$		1.7	7.5		
		$T_J = 100^\circ\text{C}$		2.4	13.5		
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	NDS7002A		1.2	2	
$T_J = 125^\circ\text{C}$		2		3.5			
$V_{GS} = 5.0 \text{ V}, I_D = 50 \text{ mA}$		1.7		3			
$V_{DS(on)}$	Drain-Source On-Voltage	$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	2N7000		0.6	2.5	V
		$V_{GS} = 4.5 \text{ V}, I_D = 75 \text{ mA}$			0.14	0.4	
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	2N7002		0.6	3.75	
		$V_{GS} = 5.0 \text{ V}, I_D = 50 \text{ mA}$			0.09	1.5	
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, I_D = 500 \text{ mA}$	NDS7002A		0.6	1	
		$V_{GS} = 5.0 \text{ V}, I_D = 50 \text{ mA}$			0.09	0.15	

Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted							
Symbol	Parameter	Conditions	Type	Min	Typ	Max	Units
ON CHARACTERISTICS Continued (Note 1)							
$I_{D(on)}$	On-State Drain Current	$V_{GS} = 4.5 \text{ V}, V_{DS} = 10 \text{ V}$	2N7000	75	600		mA
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, V_{DS} \geq 2 V_{DS(on)}$	2N7002	500	2700		
		$V_{GS} = 10 \text{ V}, V_{DS} \geq 2 V_{DS(on)}$	NDS7002A	500	2700		
g_{FS}	Forward Transconductance	$V_{DS} = 10 \text{ V}, I_D = 200 \text{ mA}$	2N7000	100	320		mS
		$V_{DS} \geq 2 V_{DS(on)}, I_D = 200 \text{ mA}$	2N7002	80	320		
		$V_{DS} \geq 2 V_{DS(on)}, I_D = 200 \text{ mA}$	NDS7002A	80	320		

รูปที่ 8.23 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่สำคัญของ MOSFET เบอร์ 2N7002

(ที่มา: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/559974/FAIRCHILD/2N7002.html>)

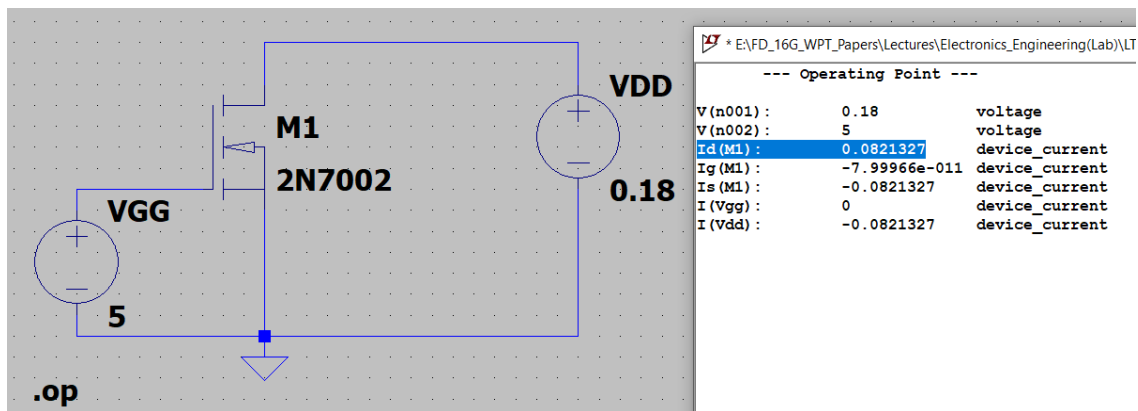
ตัวอย่างที่ 8.4 จากข้อมูลอุปกรณ์ในรูปที่ 8.23 ของ MOSFET เบอร์ 2N7002 มีค่า $I_{D(on)} = 500 \text{ mA}$. $V_{GS(th)} = 1 \text{ V}$ ทดสอบที่ $V_{GS} = 10 \text{ V}$ จงใช้ข้อมูลเหล่านี้หาค่ากระแส I_D ในกรณีที่ $V_{GS} = 5 \text{ V}$

วิธีทำ กรณีที่ $V_{GS} = 5$ ใช้สมการที่ 8.18

$$\text{จากสมการ} \quad K_n = \frac{I_{D(ON)}}{(V_{GS} - V_{GS(Th)})^2} = \frac{500mA}{(10-1)^2} = 6.17mA/V^2$$

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 6.17 \times 10^{-3} (5-1)^2 = 98.7mA$$

รูปที่ 8.24 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า I_D ในกรณีที่ในกรณีที่ $V_{GS} = 5$ V เราจะพบว่าค่า I_D ในผลการจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้ซึ่งก็เนื่องมาจากใน LTspice ใช้ค่า $V_{GS(Th)}$ ของมอสเฟตเบอร์ 2N7002 = 1.6 V นั่นเอง ดังนั้นถ้าเราอยากให้การจำลองมีค่าใกล้เคียงกันก็ให้ทดลองเปลี่ยนค่า $V_{GS(Th)} = 1.6$ V ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ค่า $I_D = 81.9mA$.



รูปที่ 8.24 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า I_D

8.6 ย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET

เราสามารถแบ่งย่านการทำงานของมอสเฟตโดยพิจารณาจากการจัดไบแอส เหมือนกับทรานซิสเตอร์หรือ เจฟเฟต ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อย่านการทำงานประกอบไปด้วยแรงดันไบแอสที่ขาเกต V_{GS} แรงดันที่ขาเดรนเทียบกับขาซอส V_{DS} และแรงดัน $V_{GS(Th)}$ โดยสามารถสรุปการทำงานของมอสเฟตชนิด n ออกเป็น 3 ย่านดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และมอสเฟตชนิด p ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านขาเดรน I_D ในแต่ละย่านการทำงานของ MOSFET ชนิด n

สภาวะการทำงาน	เงื่อนไข	สมการกระแสที่ขาเดรน I_D	ช่องนำกระแส
Cutoff	$V_{GS} < V_{GS(Th)}$	$I_D = 0$	ไม่มี
Ohmic (linear)	$V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(Th)}$	$I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{GS(Th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$	ต่อเนื่องระหว่างเดรนและซอส

Active	$V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$	$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$	ถูกตัดขาดที่จุด ใกล้เดรน
--------	---	-------------------------------------	-----------------------------

ตารางที่ 3 แสดงการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านชาเดรน I_D ในแต่ละย่านการทำงานของ MOSFET ชนิด p

สภาวะการทำงาน	เงื่อนไข	สมการกระแสที่ชาเดรน I_D	ช่องนำกระแส
Cutoff	$V_{SG} < V_{SG(Th)}$	$I_D = 0$	ไม่มี
Ohmic (linear)	$V_{SG} \geq V_{SG(Th)}$ $V_{SD} < V_{SG} + V_{SG(Th)}$	$I_D = K_P [2(V_{SG} + V_{SG(Th)})V_{SD} - V_{SD}^2]$	ต่อเนื่องระหว่างเดรนและ ซอส
Active	$V_{SG} \geq V_{SG(Th)}$ $V_{SD} \geq V_{SG} + V_{SG(Th)}$	$I_D = K_P (V_{SG} + V_{SG(Th)})^2$	ถูกตัดขาดที่จุดใกล้ซอส

8.6.1 ย่านคัทออฟ Cutoff Region โดยพิจารณามอสเฟตชนิด n มีเงื่อนไขคือ ($V_{GS} < V_{GS(Th)}$) ซึ่งเป็นย่านที่มอสเฟตไม่ทำงาน เนื่องจากแรงดันไบแอสที่ชาเกตมีค่าน้อยกว่าแรงดัน $V_{GS(Th)}$ ซึ่งจะทำให้ไม่มีกระแสไหลที่ชาเดรน $I_D = 0$ ซึ่งสามารถนำคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์ใช้งานในการทำงานเป็นสวิตช์เสมือนการเปิดวงจร (Off switch)

8.6.2 ย่านโอห์มิก Ohmic Region หรือย่านเชิงเส้น (Linear Region)

โดยพิจารณามอสเฟตชนิด n มีเงื่อนไขคือ $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(Th)}$ ซึ่งเป็นย่านที่มอสเฟตเริ่มทำงาน เนื่องจากแรงดันไบแอสที่ชาเกตมีมากกว่าหรือเท่ากับแรงดัน $V_{GS(Th)}$ และแรงดันที่ชาเกตลบกับแรงดัน $V_{GS(Th)}$ ต้องมากกว่าแรงดันที่ชาเดรนเทียบกับซอส

$$I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{GS(Th)})V_{DS} - V_{DS}^2] \tag{8.20}$$

(กรณีวงจรต่อเฉพาะ R_D)

$$V_{DS}^2 - \left[2(V_{GS} - V_{GS(Th)}) + \frac{1}{K_n R_D} \right] V_{DS} + \frac{V_{DD}}{K_n R_D} = 0 \tag{8.21}$$

(กรณีวงจรต่อ R_D และ R_S)

$$I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n(R_S^2 - R_D^2)} + \frac{2R_S V_{DD}}{(R_S^2 - R_D^2)} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{(R_S - R_D)} - \frac{2V_{DD}}{(R_S - R_D)} \right] I_D + \left[\frac{2(V_G - V_{GS(Th)})V_{DD} - V_{DD}^2}{R_S^2 + R_D^2} \right]^2 = 0 \quad (8.22)$$

8.6.3 ย่าน Active Region

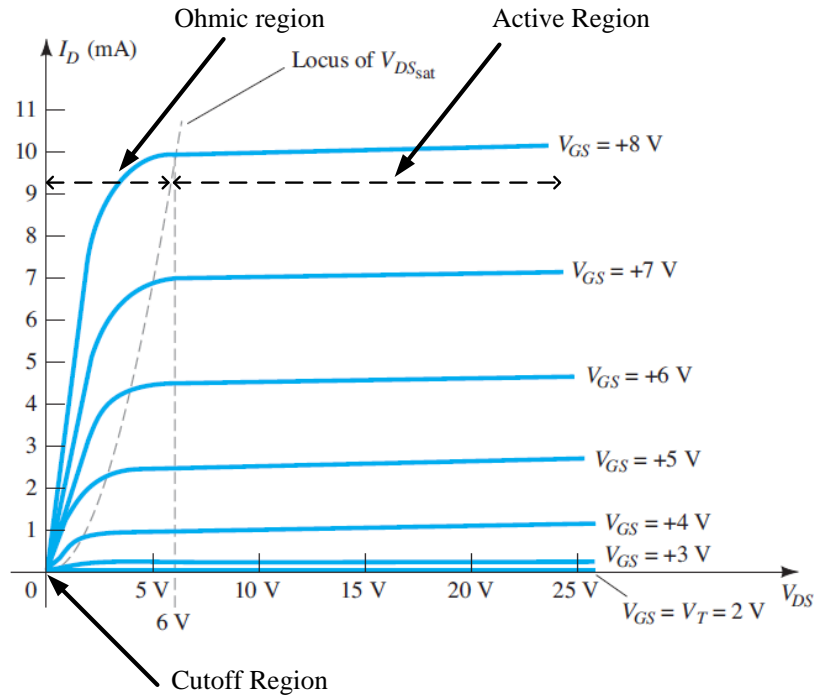
โดยพิจารณาโมสเฟตชนิด n มีเงื่อนไขคือ $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$ เป็นย่านที่โมสเฟตทำงาน เนื่องจากแรงดันไบแอสที่ขาเกตมีมากกว่าหรือเท่ากับแรงดัน $V_{GS(Th)}$ และแรงดันที่ขาเกตลบกับแรงดัน $V_{GS(Th)}$ ต่ำน้อยกว่าแรงดันที่ขาเดรนเทียบกับซอส โดยในย่านนี้ถึงแม้เราจะเพิ่มแรงดันที่ขาเกตไปอีกกระแสที่ไหลผ่านขาเดรนก็จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย บางตำราจะเรียกย่านนี้ว่าย่านอิ่มตัว Saturation Region

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 \quad (8.23)$$

(กรณีวงจรต่อ R_D และ R_S)

$$I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0 \quad (8.24)$$

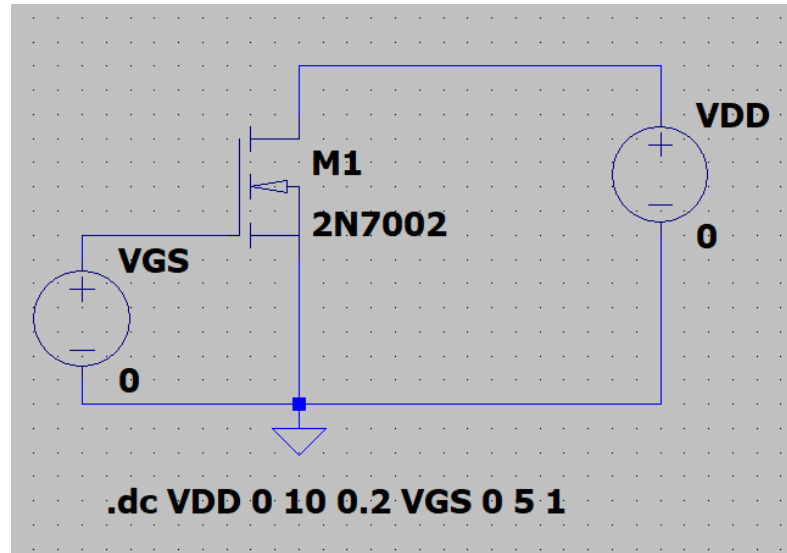
รูปที่ 8.25 แสดงกราฟคุณสมบัติของกระแสที่ขาเดรน I_D ของโมสเฟตชนิด n-type ซึ่งมีค่า V_T หรือ $V_{GS(Th)} = 2$ V ค่า $K_n = 0.278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ และแสดงย่านการทำงานทั้ง 3 ย่าน



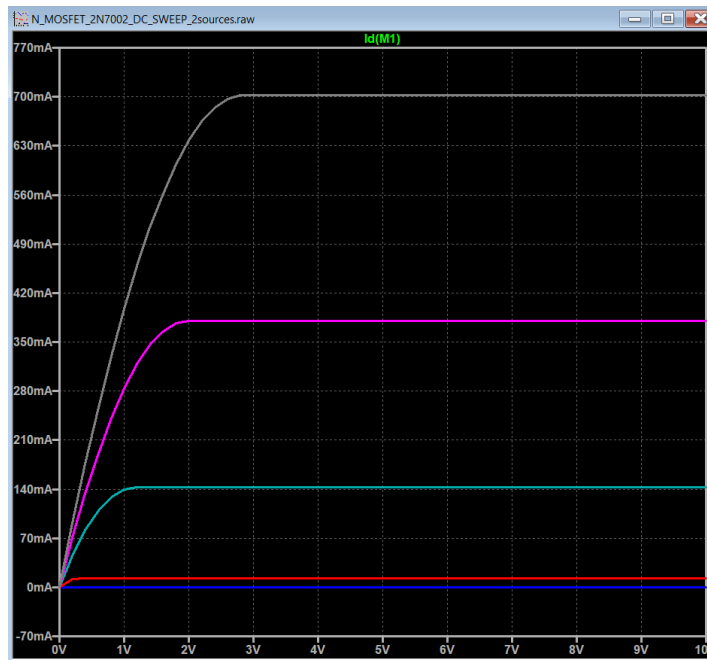
รูปที่ 8.25 กราฟคุณสมบัติของกระแสที่ขาเดรน I_D ของมอสเฟตชนิด n-type ซึ่งมีค่า V_T หรือ $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$ ค่า $K_n = 0.278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ และแสดงย่านการทำงานทั้ง 3 (Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky)

การใช้โปรแกรมจำลองหากราฟคุณสมบัติของกระแสที่ขาเดรน I_D ของมอสเฟตชนิด n-type

รูปที่ 8.26 แสดงตัวอย่างการหากราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET N-Channel ของมอสเฟตเบอร์ 2N7002 ด้วย LTspice โดยใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{DD} เป็น 1st Source หรือ V_{DS} จาก 0 V ถึง 10 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 0.2 V และ V_{GS} เป็น 2nd Source หรือ V_{GS} จาก 0 V ถึง 5 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 1 V



(ก)



(ข)

รูปที่ 8.26 ตัวอย่างการหาค่าคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์แบบ MOSFET เบอร์ 2N7002 ด้วย LTspice (ก) วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข) เส้นกราฟคุณลักษณะ

8.7 การจัดไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบมอสเฟต MOSFET

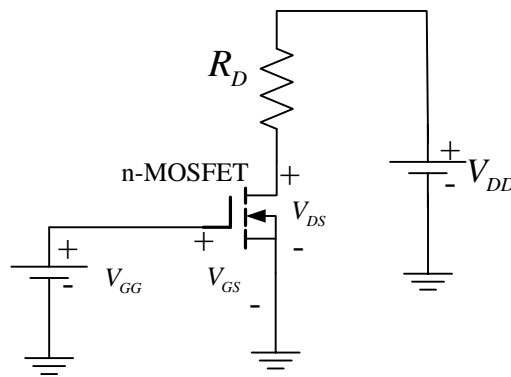
การจัดไบแอสให้มอสเฟตทำงานโดยใช้แรงดัน V_{GS} โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจรนั้นเราจะต้องสมมุติให้มอสเฟตทำงานที่ย่าน Active หรือย่านอิ่มตัวก่อน จากนั้นคำนวณหาค่า I_D แล้วไปคำนวณหาค่าแรงดัน V_{DS} ต่อแล้วจึงทำการเช็คเงื่อนไขว่ามอสเฟตทำงานในย่านอิ่มตัวจริงหรือไม่ ($V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$) ถ้าใช่

แสดงว่าสมการที่ใช้ค่ากระแสที่ไหลผ่านชาเดรนนั้นถูกต้องแล้ว แต่ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไข เป็นไปได้สูงว่ามอสเฟตจะทำงานในย่านโอห์มิกหรือย่านเชิงเส้นก็ใช้สมการในการหาค่ากระแสที่ชาเดรน (สมการที่ 8.20) คำนวณค่ากระแสที่ไหลผ่านชาเดรนใหม่แล้วไปคำนวณหาค่าแรงดัน V_{DS} ต่อ จากรูปที่ 8.27

$$\begin{aligned} \text{ค่ากระแสที่ไหลผ่านชาเดรน} \quad I_D &= K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 \\ V_{DS} &= V_{DD} - I_D R_D \end{aligned} \quad (8.25)$$

ถ้าพิสูจน์แล้วว่า ($V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$) ก็แสดงว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิมิตัว แต่ถ้าไม่ใช่ก็ต้องเปลี่ยนสมการการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านชาเดรนเป็น

$$I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{GS(Th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$$



รูปที่ 8.27 วงจรการจับโวลต์ให้มอสเฟตโดยใช้ V_{GG}

ตัวอย่างที่ 8.5 จากข้อมูลอุปกรณ์ในรูปที่ 8.28 ของ MOSFET ชนิด n มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.5 \text{ V}$ ค่า $K_n = 0.5 \text{ mA/V}^2$ จงหาค่ากระแส I_D และ V_{DS} และระบุว่ามอสเฟตถูกไบแอสให้ทำงานในย่านการทำงานใด

วิธีทำ $V_{GS} = V_{GG} = 4 \text{ V}$ ซึ่งมอสเฟตจะทำงานเนื่องจาก $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$

สมมุติว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิมิตัว

จากสมการ

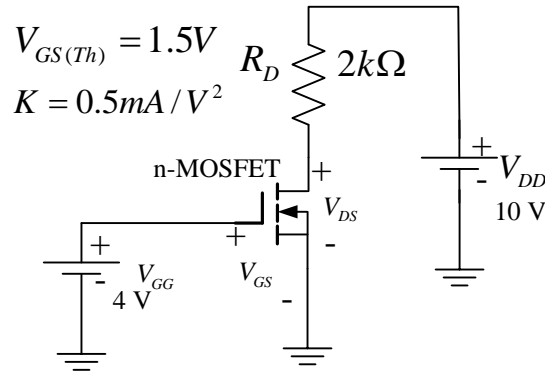
$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.5 \times 10^{-3} (4 - 1.5)^2 = 3.125 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 10 - (3.125 \times 10^{-3})(2 \times 10^3) = 3.75 \text{ V}$$

$$V_{GS} - V_{GS(Th)} = 4 - 1.5 = 2.5 \text{ V}$$

เมื่อ ($V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$) ก็แสดงว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิมิตัวก็แสดงว่าสมมุติฐานที่ตั้งไว้นั้นถูกต้องแล้ว

ตอบ



รูปที่ 8.28 วงจรการจับไปแอสให้มอสเฟตโดยใช้ V_{GS} ของตัวอย่างที่ 8.5

ตัวอย่างที่ 8.6 จากข้อมูลอุปกรณ์ในรูปที่ 8.29 ของ MOSFET ชนิด n มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.5\text{ V}$ ค่า $K_n = 0.5\text{ mA/V}^2$ จงหาค่ากระแส I_D และ V_{DS} และระบุด้วยว่ามอสเฟตถูกไบแอสให้ทำงานในย่านการทำงานใด

วิธีทำ $V_{GS} = V_{GG} = 10\text{V}$ ซึ่งมอสเฟตจะทำงานเนื่องจาก $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$
สมมติว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิ่มตัว

จากสมการ

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 0.5 \times 10^{-3} (10 - 1.5)^2 = 36.125\text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 10 - (36.125 \times 10^{-3})(2 \times 10^3) = -62.25\text{ V}$$

เมื่อหาค่าแรงดันที่ขาเดรนเทียบกับซอสแล้วไม่น่าเป็นไปได้ ดังนั้นเป็นไปได้ว่ามอสเฟตไม่ได้ทำงานในย่าน Active หรือย่านอิ่มตัว ดังนั้นจึงต้องลองใช้สมการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านขาเดรนในย่าน Ohmic

$$I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{GS(Th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

ซึ่งก็เกิดปัญหาอีกเนื่องจากเราไม่รู้ทั้งค่า I_D และ V_{DS} ดังนั้นเราต้องหาวิธีแก้สมการโดยการใช้อนุกรมของโอห์มวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่อที่ขาเดรน

$$I_{RD} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = I_D$$

จากสมการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านขาเดรน

$$\frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = K_n [2(V_{GS} - V_{GS(Th)})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

จัดสมการใหม่

$$V_{DS}^2 - \left[2(V_{GS} - V_{GS(Th)}) + \frac{1}{K_n R_D} \right] V_{DS} + \frac{V_{DD}}{K R_D} = 0$$

แทนค่าต่างๆที่รู้ค่าในสมการ

$$V_{DS}^2 - \left[2(10 - 1.5) + \frac{1}{(0.5 \times 10^{-3})(2 \times 10^3)} \right] V_{DS} + \frac{10}{(0.5 \times 10^{-3})(2 \times 10^3)} = 0$$

$$V_{DS}^2 - 18V_{DS} + 10 = 0$$

ซึ่งพบว่าเป็นสมการกำลังสองสามารถใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ โดย $a=1, b=-18, c=10$ และเมื่อแก้สมการ

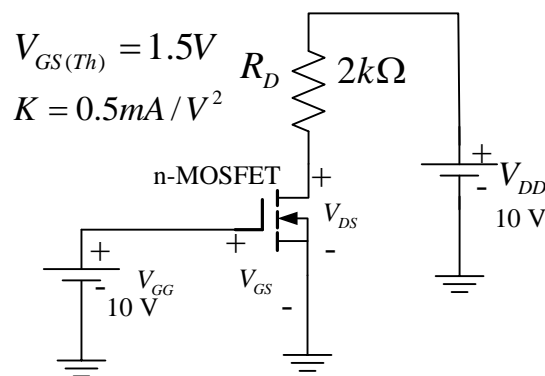
แล้วพบว่า V_{DS} มี 2 ค่าคือ $V_{DS} = 0.574V$ และ $V_{DS} = 17.43V$ โดยให้เลือกราคาที่เป็นไปได้คือ $V_{DS} = 0.574V$

ตั้งน้้นจากสมการ

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{10 - 0.574}{2 \times 10^3} = 4.713mA$$

ตอบ

และเนื่องจากเงื่อนไข $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(Th)}$ แสดงว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Ohmic หรือย่านเชิงเส้นนั่นเอง



รูปที่ 8.29 วงจรการจับไบแอสให้มอสเฟตโดยใช้ V_{GG} ของตัวอย่างที่ 8.6

ตัวอย่างที่ 8.7 จากข้อมูลอุปกรณ์ในรูปที่ 8.30 ของ MOSFET ชนิด n เบอร์ 2N7002 มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.6\text{ V}$ (ใช้ค่าเดียวกับข้อมูลอุปกรณ์ในโปรแกรม LTspice) ค่า $K_n = 80\text{ mA/V}^2$ (ค่าจาก Datasheet) จงหาค่ากระแส I_D และ V_{DS} และระบุว่ามอสเฟตถูกไบแอสให้ทำงานในย่านการทำงานใด

วิธีทำ วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน $V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD} = \left(\frac{10\text{ k}\Omega}{100\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega} \right) 24 = 2.181\text{ V}$ ซึ่งมอสเฟตจะทำงานเนื่องจาก $V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$

สมมติว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิ่มตัว

จากสมการ

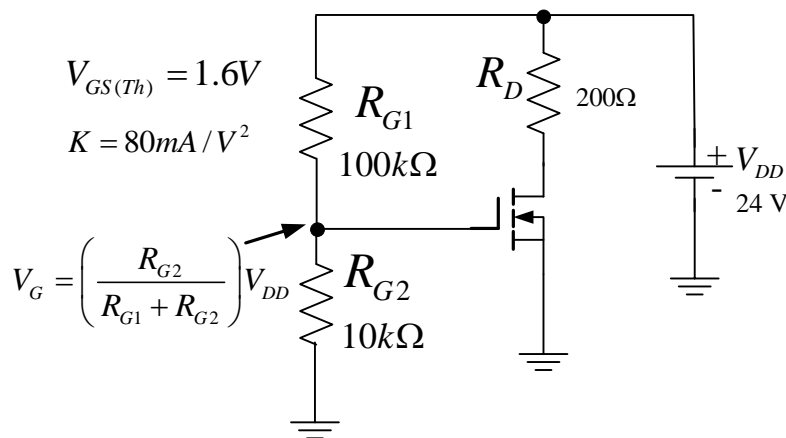
$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2 = 80 \times 10^{-3} (2.181 - 1.6)^2 = 27.08\text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24 - (27.08 \times 10^{-3})(200) = 18.58\text{ V}$$

$$V_{GS} - V_{GS(Th)} = 4 - 1.5 = 0.581\text{ V}$$

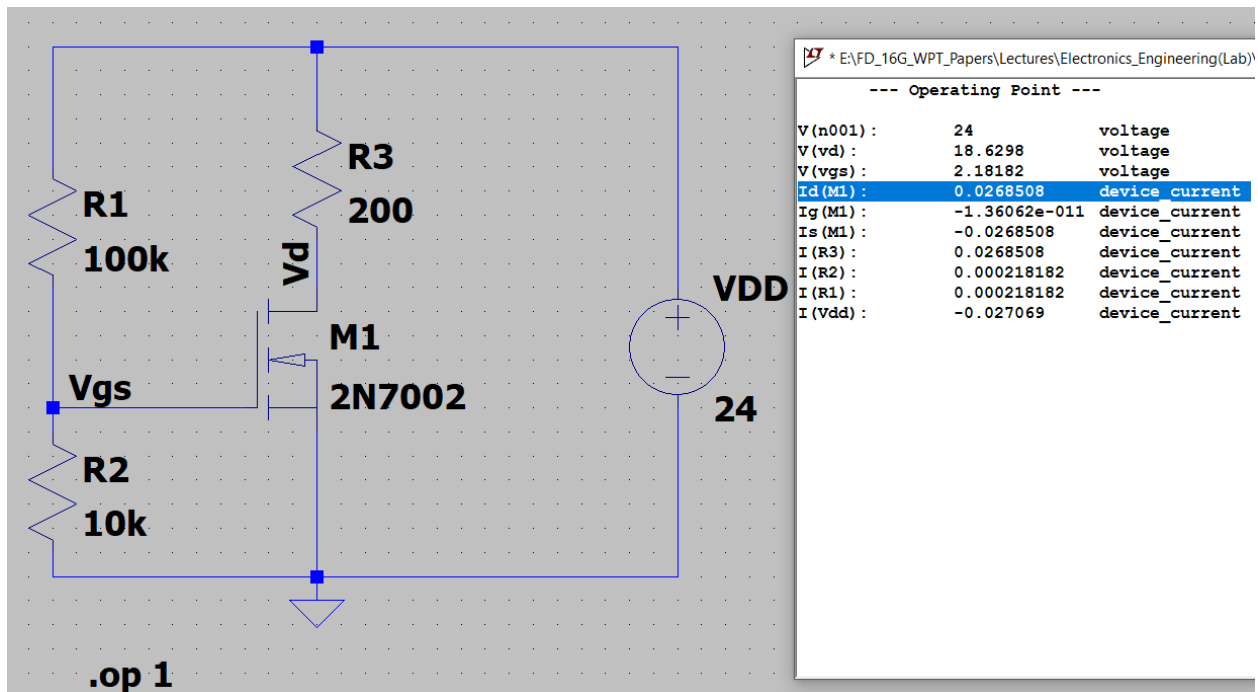
เมื่อ $(V_{GS} \geq V_{GS(Th)}$ และ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{GS(Th)}$) ก็แสดงว่ามอสเฟตทำงานในย่าน Active หรือย่านอิ่มตัวก็แสดงว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นถูกต้องแล้ว

ตอบ



รูปที่ 8.30 วงจรการจัดไบแอสให้มอสเฟตโดยใช้วงจรแบ่งแรงดันของตัวอย่างที่ 8.7

รูปที่ 8.31 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่ากระแส I_D และ V_{DS} พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้



รูปที่ 8.31 การพิสูจน์คำตอบโดยใช้ LTspice จำลองการทำงานของวงจรทดสอบหาค่า I_D

เอกสารอ้างอิง

1. <https://datasheet.octopart.com/2N5564-Vishay-datasheet-40514.pdf>
2. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
3. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.
4. Donald A. Neamen. Microelectronics. Circuit Analysis and Design 4th Edition, 2010
5. <https://studylib.net/doc/18208291/nmos-examples>

ใบงานที่ 8. ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

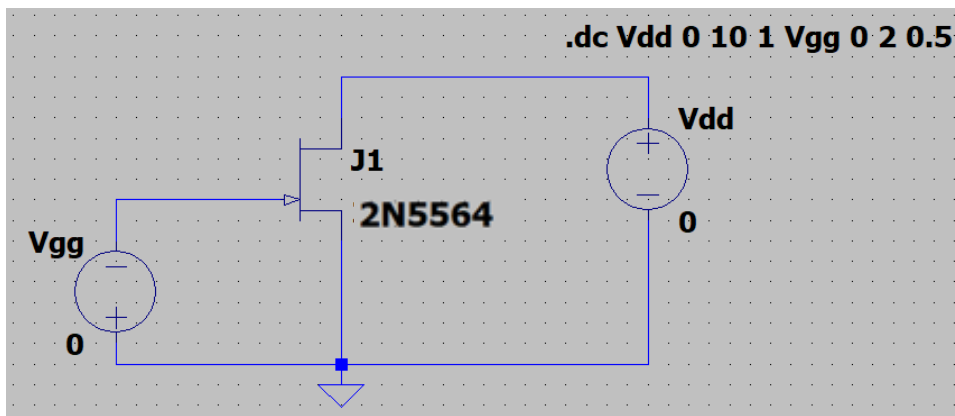
- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า
- 1.2 เพื่อศึกษาการไบแอสทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า และสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ 2N5564
4. ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ 2N5434
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
6. แอมป์มิเตอร์ 1 ตัว
7. โวลต์มิเตอร์

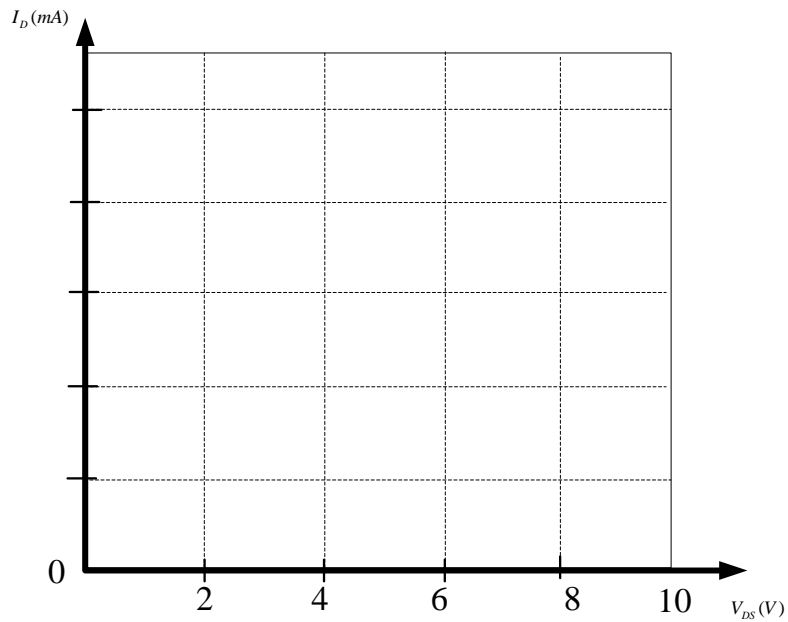
การทดลองที่ 8.1 การใช้โปรแกรมจำลองหากราฟคุณลักษณะของการใช้แรงดัน V_{GS} ควบคุมกระแสที่ขาเดรน

8.1.1 จากรูปที่ 8.32 จงจำลองหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ JFET N-Channel เบอร์ 2N5564 ด้วย LTspice โดยใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{DD} เป็น 1st Source หรือ V_{DS} จาก 0 V ถึง 10 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 1 V และ V_{GG} เป็น 2nd Source หรือ V_{GS} จาก 0 V ถึง 2 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 0.5 V



รูปที่ 8.32 วงจรใน LTspice ที่ใช้ในการจำลอง

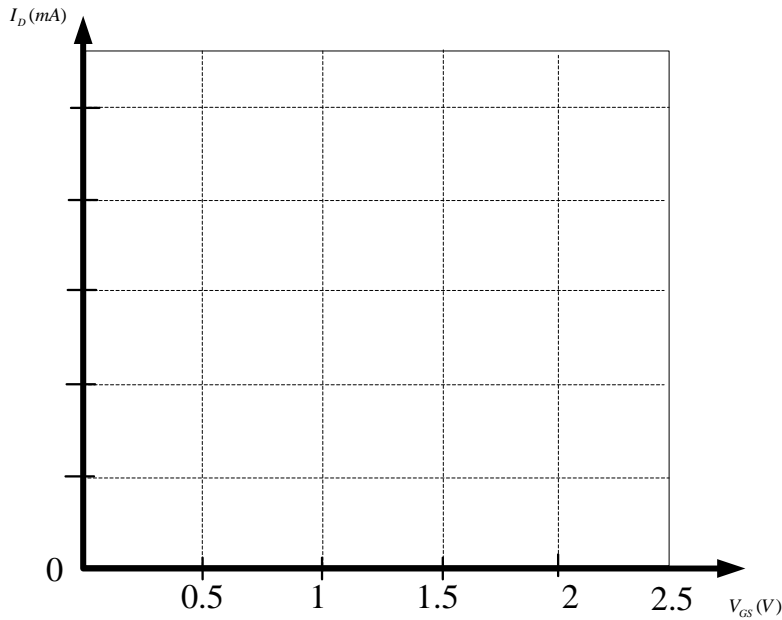
ผลการจำลองแสดงค่า I_D เทียบกับ V_{DS}



รูปที่ 8.33 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

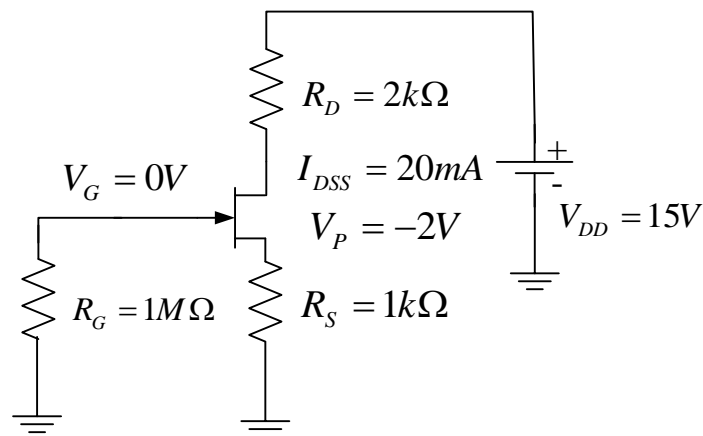
8.1.2 จงใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{GS} จาก 0 V ถึง 2.5 V โดยใช้ Step ของการปรับที่ละ 0.5 V โดยให้ V_{DD} คงที่ = 10 V

ผลการจำลองแสดงค่า I_D เทียบกับ V_{GS}



รูปที่ 8.34 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

การทดลองที่ 8.2 จากวงจรรูปที่ 8.35 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้ V_{GS_Q} , I_{D_Q} , V_{DS} , V_S , V_G , V_D ดูแนวทางจากตัวอย่างที่ 8.3 โดย JFET เบอร์ 2N5564 มี $V_{GS(off)} = -2\text{ V}$ (ค่า Typical) และ $I_{DSS} = 20\text{ mA}$. พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม LTspice



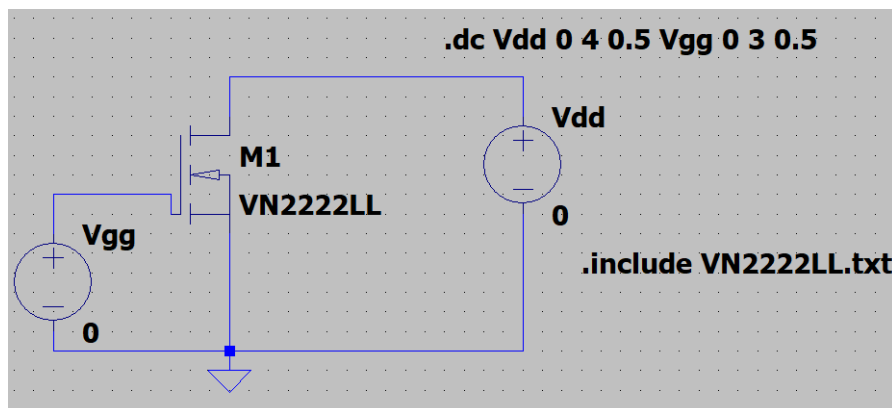
รูปที่ 8.35 วงจร JFET แบบไบแอสตัวเอง

พารามิเตอร์	วิธีการคำนวณ/ผลการคำนวณ	ผลการจำลอง
V_{GS_Q}		

*หมายเหตุ: ให้เลือก		
$I_D = I_{DSS} / 2$		
I_{DQ}		
V_{DS}		
V_S		
V_G		
V_D		

การทดลองที่ 8.3 การใช้โปรแกรมจำลองหากราฟคุณลักษณะของการใช้แรงดัน V_{GS} ควบคุมกระแสที่ขาแตรน I_D

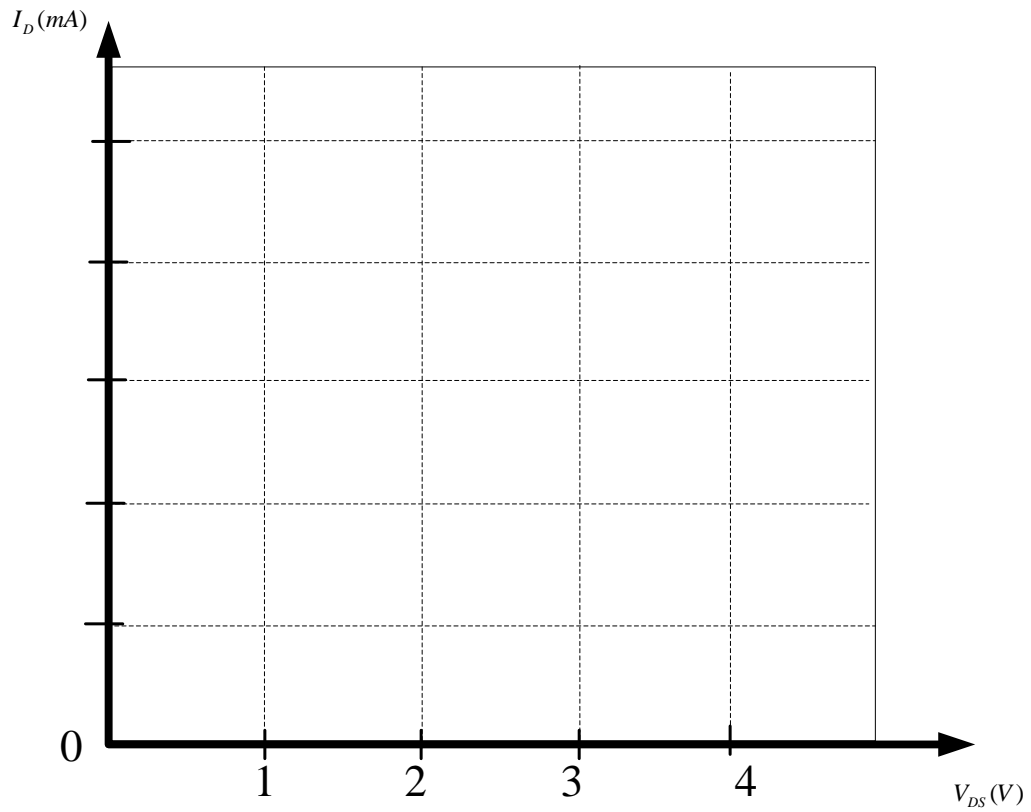
8.3.1 จากรูปที่ 8.36 จงจำลองหาคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET N-Channel เบอร์ VN2222LL ด้วย LTspice โดยใช้โหมด DC sweep ปรับแรงดัน V_{DD} เป็น 1st Source หรือ V_{DS} จาก 0 V ถึง 4 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 0.5 V และ V_{GG} เป็น 2nd Source หรือ V_{GS} จาก 0 V ถึง 3 V โดยใช้ Step ของการปรับทีละ 0.5 V โดยใช้ Spice Model ของมอสเฟตเบอร์ VN2222LL ที่ให้มาแล้วsaveใน Notepad ชื่อไฟล์ VN2222LL.txt จากนั้นใช้ SPICE Directive (.include VN2222LL.txt) ตามแสดงในรูปที่ 8.36



รูปที่ 8.36 วงจร MOSFET ที่ใช้ในการจำลอง

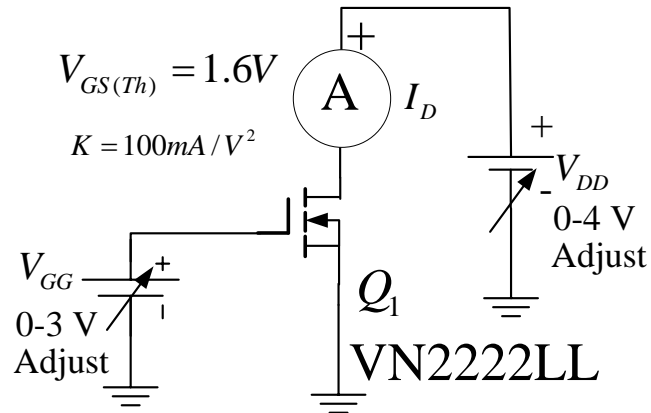
Spice Model ของมอสเฟตเบอร์ VN2222LL

```
.MODEL VN2222LL NMOS (LEVEL=3 RS=0.205 NSUB=1.0E15
+DELTA=0.1 KAPPA=0.0506 TPG=1 CGDO=3.1716E-9
+RD=0.439 VTO=1.600 VMAX=1.0E7 ETA=0.0223089
+NFS=6.6E10 TOX=1.0E-7 LD=1.698E-9 UO=862.425
+XJ=6.4666E-7 THETA=1.0E-5 CGSO=9.09E-9 L=2.5E-6
+W=0.8E-2)
.ENDS
```

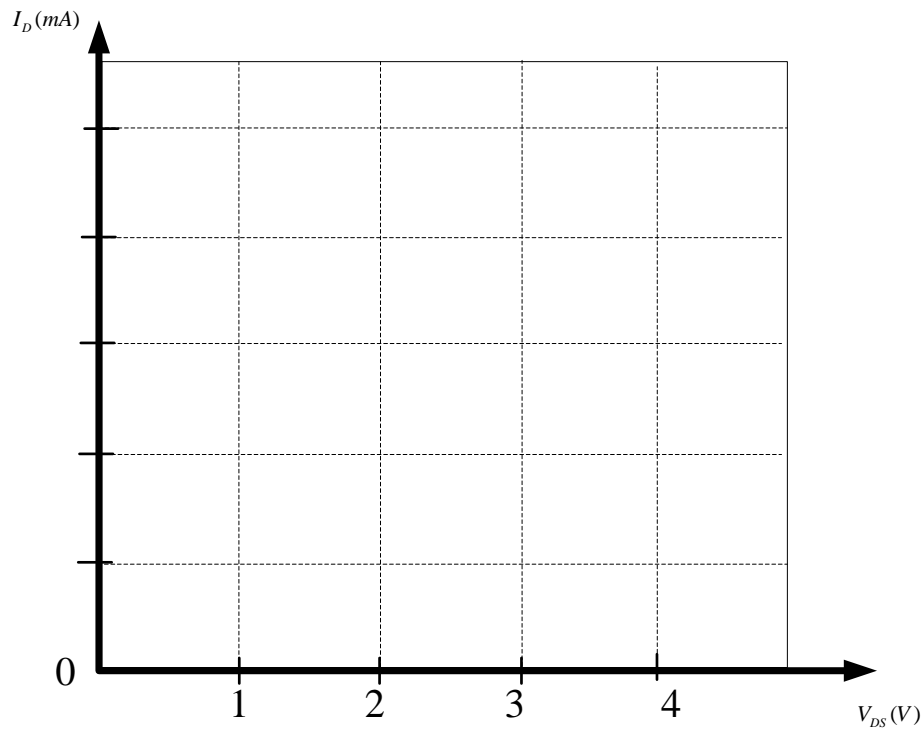


รูปที่ 8.37 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

8.3.2 ทำการต่อวงจรจริงพร้อมกับวัดค่าต่างๆ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองโดยทำการวัดค่าเหมือนกับการจำลองทุกประการพร้อมกับพล็อตกราฟในรูปที่ 8.39



รูปที่ 8.38 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง



รูปที่ 8.39 กราฟแสดงคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง

สรุปผลการทดลอง

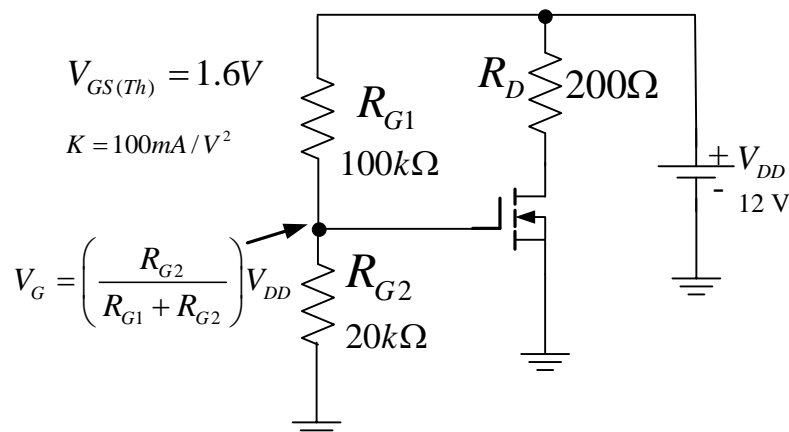
.....

.....

.....

การทดลองที่ 8.4 การทดลองวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET ชนิด N

จากวงจรที่ 8.40 จงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆและจำลองการทำงานพร้อมทั้งวัดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจาก Datasheet ของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL



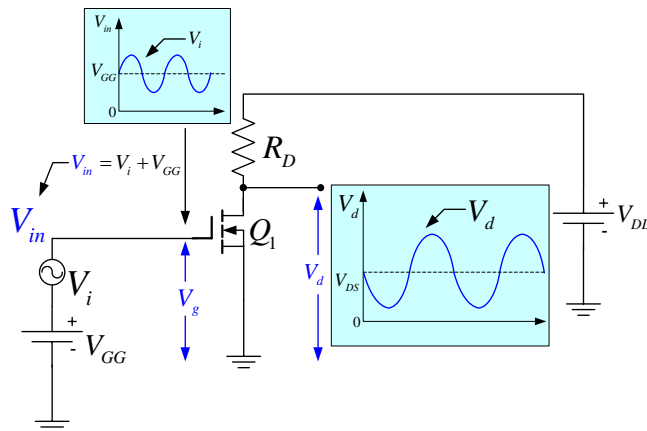
รูปที่ 8.40 วงจรที่ใช้ในการทดลองจริง

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$			
$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$			
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$			
$V_{DS(ON)} = V_{GS} - V_{GS(Th)}$			
ย่านการทำงาน			

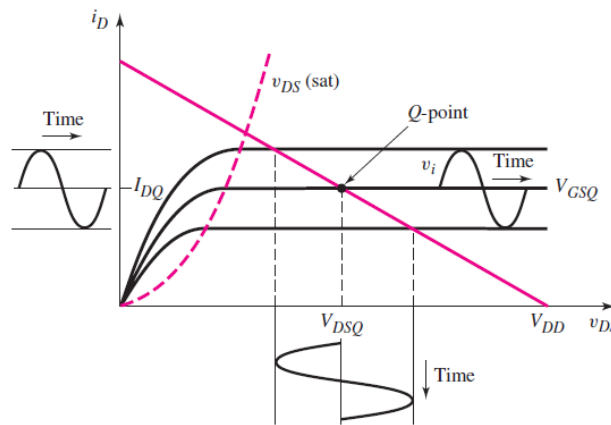
บทที่ 9 วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า

9.1 การขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET

วงจรถ่ายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET แสดงรูปที่ 9.1 ใช้การไบแอสคงที่โดยมีแรงดัน V_{GG} ทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับขา G แหล่งจ่ายสัญญาณอินพุต V_i ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่นไซน์(ไฟสลับ)และเมื่อรวมกันกับแรงดันไบแอสไฟตรงทำให้แรงดันมีการยกระดับขึ้นไป ซึ่งแทนด้วยแรงดัน V_{in} การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกระแสที่ขาเดรนเนื่องจากค่าอัตราขยายกระแสและส่งผลทำให้แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอสเพิ่มขึ้นหรือลดลง



รูปที่ 9.1 แสดงวงจรถ่ายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ MOSFET



รูปที่ 9.2 ac load line แสดงการทำงานของวงจรถ่ายแรงดันด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าชนิด MOSFET ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ณ ตำแหน่ง Q (Q-Point)

ที่มา :Donald A. Neamen

ค่ากระแสที่ไหลผ่านขาเดรนเปลี่ยนแปลงสูงหรือต่ำบนตำแหน่ง Q (Q-Point) ดังแสดงในรูปที่ 9.2 ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ I_{DQ} และมีเฟสเดียวกันกับแรงดันที่ขาเกต ณ ตำแหน่ง Q (Q-Point) ส่วนแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส V_{DSQ} เปลี่ยนแปลงสูงหรือต่ำบนตำแหน่ง Q (Q-Point) โดยมีเฟสต่างกัน 180° กับเฟสของแรงดันที่ขาเกต

ค่าอัตราขยายแรงดัน A_v สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9.1

$$A_v = -g_m R_D \quad (9.1)$$

เมื่อ g_m ทรานส์คอนดักแตนซ์ (A/V) สามารถหาได้จากสมการที่ 9.2 และที่เป็นฟังก์ชันกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขาเดรน I_D ดังสมการที่ 9.3

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GSQ}} = 2K_n (V_{GSQ} - V_{GS(th)}) \quad (9.2)$$

หรือ

$$g_m = 2\sqrt{K_n I_D} \quad (9.3)$$

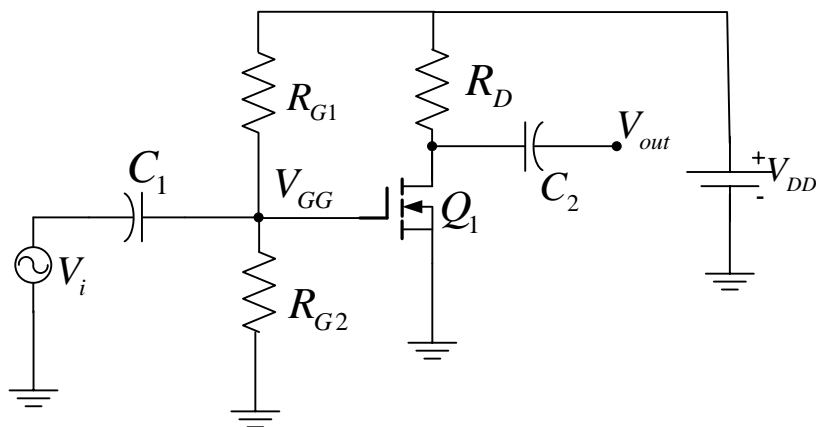
ตัวอย่างที่ 9.1 จากข้อมูลอุปกรณ์ของ MOSFET ชนิด n มีค่า $I_D = 0.4\text{mA}$, $V_{GS(th)} = 0.4\text{V}$ และ $K_n = 1.25\text{mA/V}^2$ จงหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m (A/V)

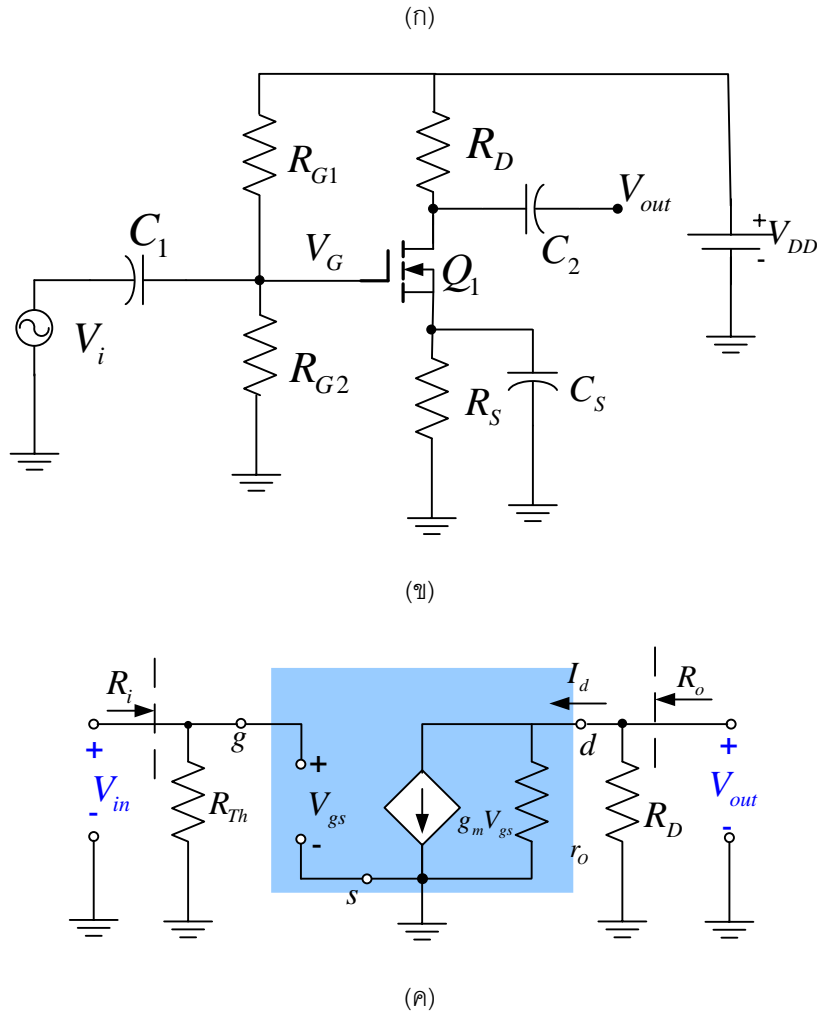
วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad g_m &= 2\sqrt{K_n I_D} \\ g_m &= 2\sqrt{1.25 \times 10^{-3} \times 0.4 \times 10^{-3}} = 1.14\text{mA/V} \end{aligned}$$

9.2 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าชนิด MOSFET แบบขอส่วร่วม (Common-Source Amplifier)

รูปที่ 9.6 แสดงวงจรขยายขอส่วร่วมที่ใช้วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน โดยจำเป็นจะต้องต่อตัวเก็บประจุในภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตเพื่อแยกแรงดันไฟตรงและไฟฟ้ากระแสสลับออกจากกัน





รูปที่ 9.6 วงจรขยายข้อสร่วมโดยใช้วงจรไบแอสที่ขาคเกตแบบแบ่งแรงดัน (ก)กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D (ข)กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S (ค) วงจรสมมูลย์

อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อนซึ่งอธิบายไว้ในเนื้อหาบทที่ 8 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาคเกต
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาคเกต dc
$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$	กระแสที่ขาคเดรน dc

	(กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)
$I_D = K_n(V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$	กระแสที่ขาเดรน dc กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)
$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)

จากสมการการหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์ $g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9.4

$$A_v = -g_m (R_D \parallel r_o) \quad (9.4)$$

โดย $r_o = \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$

กรณี $r_o = \infty$ ($\lambda = 0$) ดังนั้นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจึงพิจารณาได้ดังนี้

$$A_v \cong -g_m R_D \quad (9.5)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสคงที่ รูปที่ 9.6 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{in} = R_{G1} \parallel R_{G2} \quad (9.6)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต (กรณี $r_o = \infty$)

กรณีไม่มี R_L

$$R_{out} = R_D \quad (9.7ก)$$

กรณีมี R_L

$$R_{out} = R_D \parallel R_L \quad (9.7ข)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต (กรณี $r_o \neq \infty$)

กรณีไม่มี R_L

$$R_{out} = R_D \parallel r_o \quad (9.7ค)$$

กรณีมี R_L

$$R_{out} = R_D \parallel R_L \parallel r_o \quad (9.7ง)$$

การเลือกตัวเก็บประจุคัปปลิ่งและตัวเก็บประจุบายพาส

การเลือกตัวเก็บประจุขาเข้า C_1 ตัวเก็บประจุขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาซอส C_s (กรณีวงจรที่ต่อตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาซอสขนานกับ R_S) จะใช้หลักการเดียวกันกับทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์นั่นคือ เวลาวิเคราะห์ในการทำงานการขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแทนที่ด้วยการลัดวงจรที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากการเลือกค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้เพื่อทำให้ X_C มีค่าเล็กน้อยที่ความถี่สัญญาณและถือได้ว่า X_C มีค่าเป็นศูนย์โอห์ม การเลือกตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง C_1, C_2 เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณความถี่เสียงส่วนใหญ่เป็นแบบ High Pass Filter ดังนั้นจึงมองความถี่ต่ำที่สุดที่อยู่ในย่านความถี่เสียง (ประมาณ 20 Hz) โดยเราเรียกความถี่นี้ว่าเป็นความถี่คัทออฟ f_c โดยตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง C_1 สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

หาค่าคงที่ทางเวลาโดยใช้สูตรดังนี้

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (9.8)$$

ตัวเก็บประจุคัปปลิ่งด้านขาเข้า C_1 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_m} \quad (9.9)$$

โดย R_i คือ ค่าความต้านทานภายในแหล่งจ่ายด้านขาเข้าถ้าไม่ระบุให้ละทิ้งได้

ตัวเก็บประจุคัปปลิ่งด้านขาออก C_2 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$C_2 = \frac{\tau}{R_D + R_L} \quad (9.10)$$

แต่อย่างไรก็ตามผลของ Source Bypass Capacitor ต่อแรงดันไฟฟ้าตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาซึ่งค่าของตัวเก็บประจุบายพาสต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้คาร์แอคแทนซ์ในช่วงความถี่ของวงจรขยายมีขนาดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (โดยในอุดมคติเท่ากับ 0Ω) เมื่อเทียบกับ R_S ดังนั้นการเลือกคาร์แอคแทนซ์แบบ capacitive X_C ของตัวเก็บประจุบายพาส ควรน้อยกว่า R_S อย่างน้อย 10 เท่าที่ความถี่ต่ำสุดที่วงจรขยายต้องทำงาน

$$10X_C \leq R_S \quad (9.11)$$

จากวงจรรูปที่ 9.6 (ค) ค่าตัวเก็บประจุบายพาสสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$X_{C_s} = \frac{R_S}{10} \quad (9.12)$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi f X_{C_s}} \quad (9.13)$$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสพิจารณาได้ดังนี้

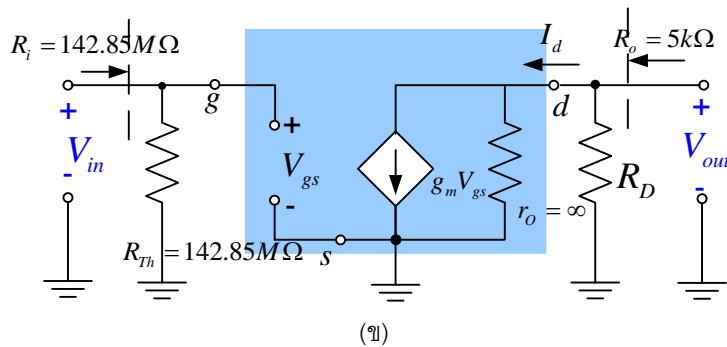
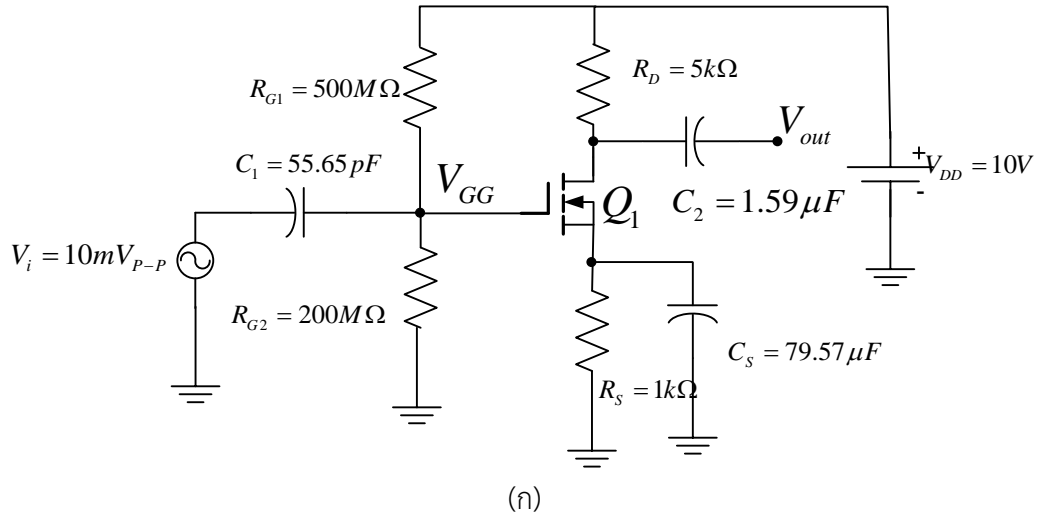
$$A_v \cong \frac{-g_m R_D}{R_S} \quad (9.14)$$

Note ผลกระทบของ R_S กรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสทำให้อัตราขยายทางสัญญาณไฟฟ้า กระแสกลับลดลงนั่นเอง

ตัวอย่างที่ 9.2 จากวงจรในรูปที่ 9.7 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ มีค่า $V_{GS(th)} = 1\text{ V}$, $K_n = 1\text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0$ และ V_i ทำงาน ในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz มีค่าแอมพลิจูด 10 mV_{P-P}



รูปที่ 9.7 (ก) วงจรขยายขอสรรวมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูล

ตารางที่ 9.3 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเกต	142.85MΩ
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเกต dc	2.85V
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$ <p>หรือ</p> $I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0$ <p>*ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D</p> <p>ได้ค่า I_D มา 2 ค่า ให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$</p>	กระแสที่ขาเดรน dc กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S	0.9mA
$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S)	4.6 V

ตารางที่ 9.4 การวิเคราะห์ ac analysis

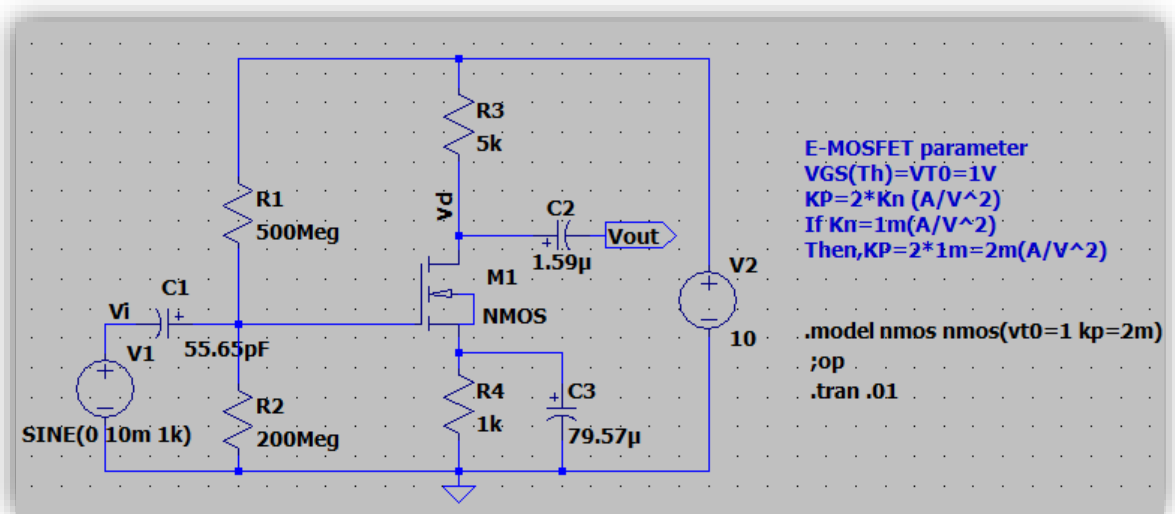
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	1.89 mA/V
$A_v \cong -g_m R_D$	อัตราขยายแรงดัน	-9.45 (เครื่องหมาย - แสดงถึงการกลับเฟสสัญญาณ)
$R_m = R_{G1} \parallel R_{G2}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	142.85MΩ
$R_{out} = R_D$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	5kΩ
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ย่านความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	7.95×10^{-3}
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_m}$	ตัวเก็บประจุฟุ้งขาเข้า	55.65 pF

$C_2 = \frac{\tau}{R_D + R_L}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	1.59 μF
$X_{C_s} = \frac{R_s}{10} = 100$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาซอส	79.57 μF
$C_s = \frac{1}{2\pi f X_{C_s}}$		

เพื่อตรวจสอบคำตอบ เราสามารถใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรโดยการต่อวงจรในรูปที่ 9.8(ก) โดยเราจะใช้ NMOS ซึ่งจะต้องเพิ่มรายละเอียดของโมเดลดังนี้ ค่า v_{t0} คือค่า $V_{GS(th)}$ ค่า $k_p = 2 \times K_n$ ยกตัวอย่างเช่น $K_n = 1mA/V^2$ จะได้ค่า $k_p = 2 \times (1 \times 10^{-3}) = 2mA/V^2$

.model nmos nmos(vt0=1 kp=2m)

ส่วนรูปที่ 9.8(ข) แสดงผลการจำลองในส่วนของ dc และเมื่อเทียบกับการคำนวณพบว่ามีความถี่ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อจำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient) จะพบว่าเมื่อจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์ซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $10mV_{p-p}$ ความถี่ 1 kHz จะได้สัญญาณเอาต์พุตซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $94.29mV_{p-p}$ ความถี่ 1 kHz แต่จะมีเฟสกลับกัน 180° ดังแสดงในรูป 9.8(ค) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราขยายแรงดันที่ได้จากการคำนวณ

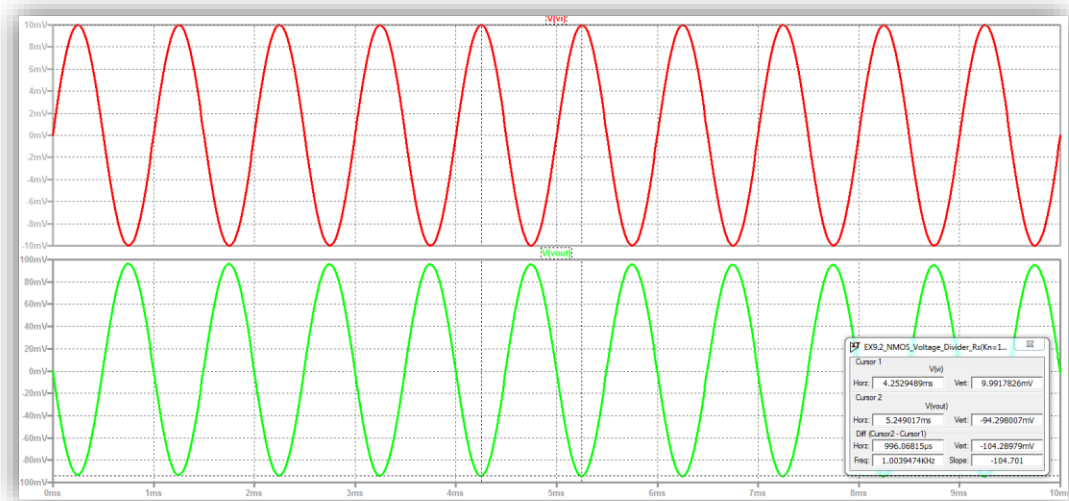


(ก)

```

--- Operating Point ---
V(vd) :          5.47229      voltage
V(vg) :          2.85714      voltage
V(n003) :        0.905543     voltage
V(n002) :        1.055        voltage
V(n001) :        10          voltage
V(vi) :          0           voltage
V(vout) :        8.70092e-006 voltage
Id(M1) :         0.000905543   device_current
Ig(M1) :         0           device_current
Ib(M1) :        -1.05499e-012 device_current
Is(M1) :        -0.000905543   device_current
I(C3) :         7.2054e-017    device_current
I(C2) :         8.70092e-018    device_current
I(C1) :         1.59e-022      device_current
I(R4) :         0.000905543   device_current
I(R3) :         0.000905543   device_current
I(R2) :         1.42857e-008   device_current
I(R1) :         1.42857e-008   device_current
I(V1) :         1.59e-022      device_current
I(V2) :        -0.000905557   device_current
    
```

(ข)

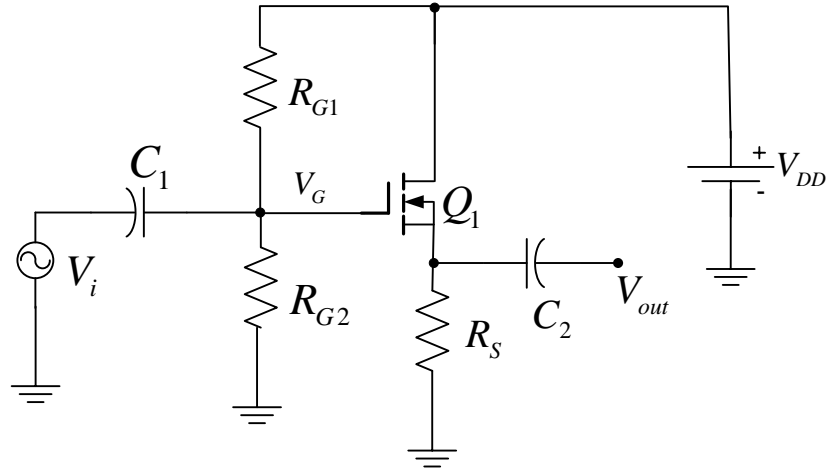


(ค)

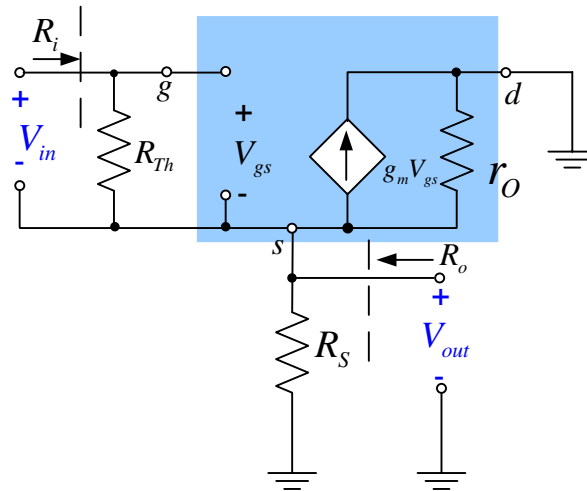
รูปที่ 9.8(ก) วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข)ผลการจำลองในส่วนของ dc (ค)ผลการจำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient)

9.3 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าชนิด MOSFET แบบเดรนร่วม (Common-Drain Amplifier)

รูปที่ 9.9 แสดงวงจรขยายเดรนร่วมที่ใช้วงจรถไบแอสแบบแบ่งแรงดัน โดยจำเป็นจะต้องต่อตัวเก็บประจุในภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตเพื่อแยกแรงดันไฟตรงและไฟฟ้ากระแสสลับออกจากกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 9.9 วงจรขยายเดรนร่วมโดยใช้วงจรถไบแอสที่ขาคเกตแบบแบ่งแรงดัน (ก)กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_S (ข) วงจรสมมูลย์

อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อนซึ่งอธิบายไว้ในเนื้อหาบทที่ 8 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.4 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเกต
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเกต dc
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$	กระแสที่ขาเดรน dc กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_S
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_S)
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)

จากสมการการหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์ $g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9.15

$$A_v = \frac{R_S \parallel r_o}{\frac{1}{g_m} + R_S \parallel r_o} \quad (9.15)$$

โดย $r_o = \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$

กรณี $r_o = \infty$ ($\lambda = 0$) ดังนั้นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจึงพิจารณาได้ดังนี้

$$A_v \cong \frac{R_S}{\frac{1}{g_m} + R_S} \quad (9.16)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสคงที่ รูปที่ 9.6 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{in} = R_{G1} \parallel R_{G2} \quad (9.17)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต (กรณี $r_o = \infty$)

กรณีไม่มี R_L

$$R_{out} = R_S \parallel \left(\frac{1}{gm} \right) \quad (9.18ก)$$

กรณีมี R_L

$$R_{out} = R_S \parallel \left(\frac{1}{gm} \right) \parallel R_L \quad (9.18ข)$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต (กรณี $r_o \neq \infty$)

กรณีไม่มี R_L

$$R_{out} = R_S \parallel r_o \parallel \left(\frac{1}{gm} \right) \quad (9.18ค)$$

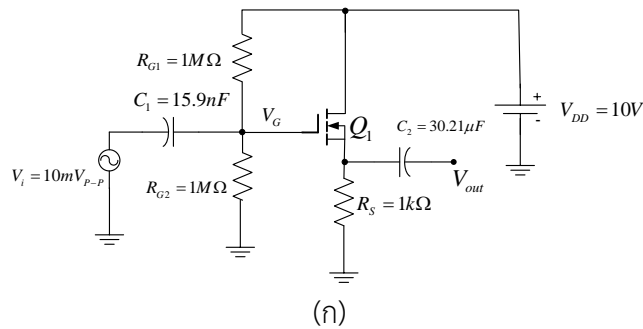
กรณีมี R_L

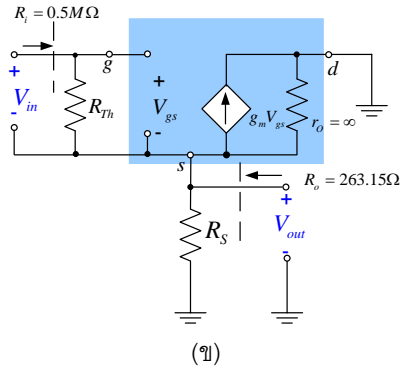
$$R_{out} = R_S \parallel r_o \parallel \left(\frac{1}{gm} \right) \parallel R_L \quad (9.18ง)$$

ตัวอย่างที่ 9.3 จากวงจรในรูปที่ 9.10 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 และขาออก C_2

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ มีค่า $V_{GS(Th)} = 1 \text{ V}$, $K_n = 0.5 \text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0$ และ V_i ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz มีค่าแอมพลิจูด 10 mV_{P-P}





รูปที่ 9.10 (ก) วงจรขยายเดรนร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูล

ตารางที่ 9.5 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเกต	0.5M Ω
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเกต dc	5V
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$ $I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0$ *ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D ได้ค่า I_D มา 2 ค่า ให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$	กระแสที่ขาเดรน dc	2mA
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส	8 V

ตารางที่ 9.6 การวิเคราะห์ ac analysis

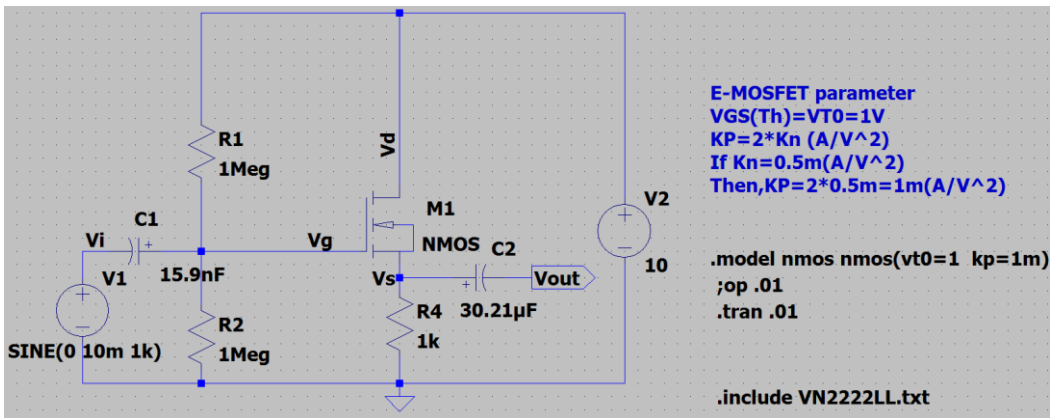
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	2.8 mA/V

$A_v \cong \frac{R_S}{\frac{1}{g_m} + R_S}$	อัตราขยายแรงดัน	0.738
$R_m = R_{G1} \parallel R_{G2}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	0.5MΩ
$R_{out} = R_S \parallel \frac{1}{g_m}$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	263.15 Ω
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ย่านความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	7.95×10^{-3}
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_m}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า	15.9 nF
$C_2 = \frac{\tau}{R_S \parallel \left(\frac{1}{g_m} \right) + R_L}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	30.21 μF

เพื่อตรวจสอบคำตอบ เราสามารถใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรโดยการต่อวงจรในรูปที่ 9.11(ก) โดยเราจะใช้ NMOS ซึ่งจะต้องเพิ่มรายละเอียดของโมเดลดังนี้ ค่า vt0 คือค่า $V_{GS(th)}$ ค่า kp = $2 \times K_n$ ยกตัวอย่างเช่น $K_n = 0.5mA/V^2$ จะได้ค่า $kp = 2 \times (0.5 \times 10^{-3}) = 1mA/V^2$

```
.model nmos nmos(vt0=1 kp=1m)
```

ส่วนรูปที่ 9.11(ข) แสดงผลการจำลองในส่วนของ dc และเมื่อเทียบกับการคำนวณพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน dki จำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient) จะพบว่าเมื่อจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์ซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $10mV_{P-P}$ ความถี่ 1 kHz จะได้สัญญาณเอาต์พุตซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $6.6mV_{P-P}$ ความถี่ 1 kHz และมีเดียวกันแสดงในรูป 9.11(ค) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราขยายแรงดันที่ได้จากการคำนวณ

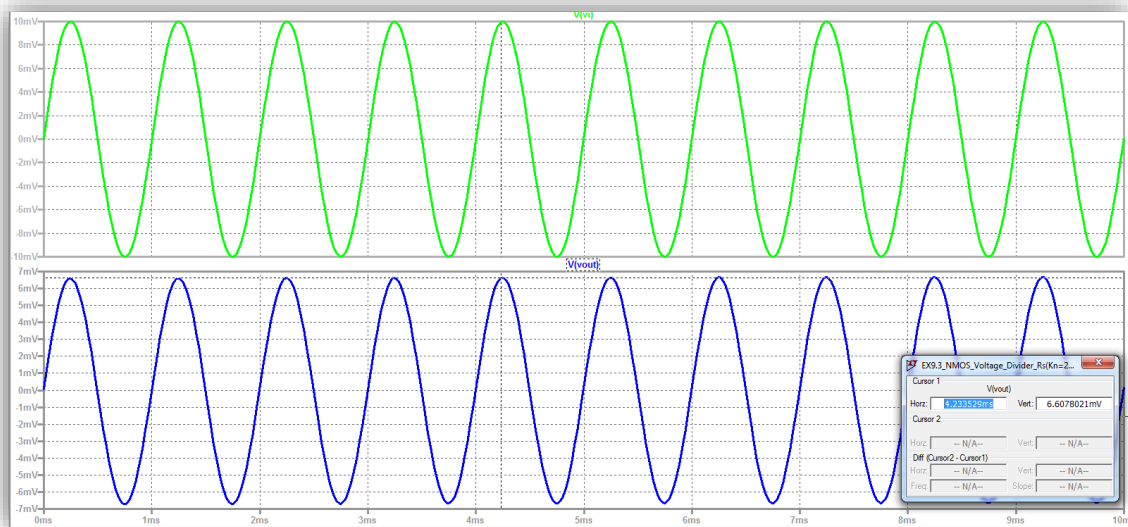


(ก)

```

--- Operating Point ---
V(vd) :      10      voltage
V(vg) :      5      voltage
V(vs) :      2      voltage
V(n001) :    2.16335 voltage
V(vi) :      0      voltage
V(vout) :    6.04182e-005 voltage
Id(M1) :    0.002   device_current
Ig(M1) :    0      device_current
Ib(M1) :    -2.1626e-012 device_current
Is(M1) :    -0.002  device_current
I(C2) :    6.04182e-017 device_current
I(C1) :    7.95e-020 device_current
I(R4) :    0.002   device_current
I(R2) :    5e-006  device_current
I(R1) :    5e-006  device_current
I(V1) :    7.95e-020 device_current
I(V2) :    -0.002005 device_current
    
```

(ข)

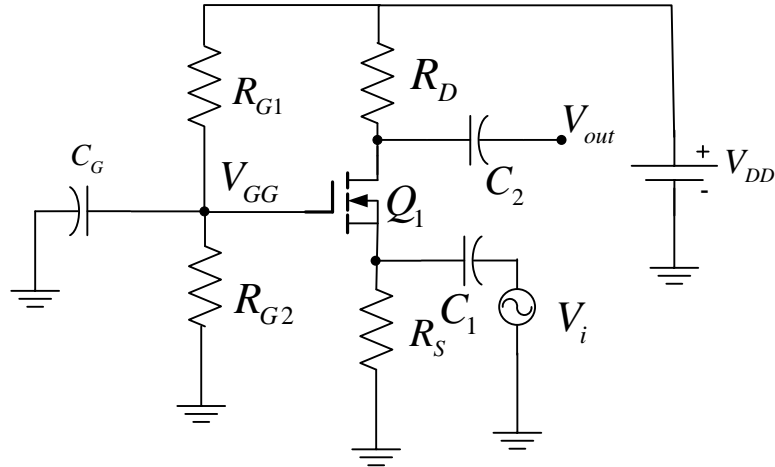


(ค)

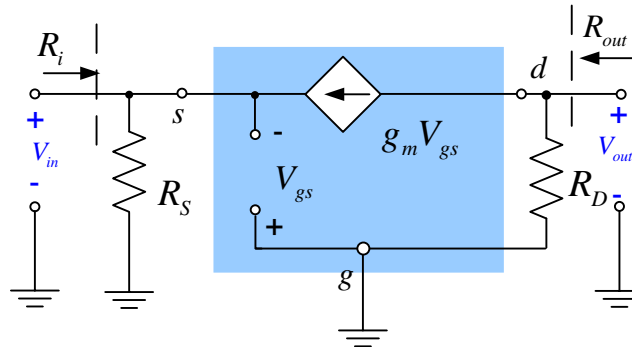
รูปที่ 9.11(ก) วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข)ผลการจำลองในส่วนของ dc (ค)ผลการจำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient)

9.4 วงจรขยายทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าชนิดMOSFETแบบเกตร่วม (Common-Gate Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบเกตร่วม ดังแสดงในรูปที่ 9.12 เป็นวงจรขยายเกตร่วมที่มีวงจรวินแอสแบบแบ่งแรงดันโดยสัญญาณอินพุตจะถูกต่อเข้ากับขาซอสแต่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งออกทางขาเดรนแทน นอกจากนี้ที่ขาเกตจะต่อตัวเก็บประจุบายพาสเพื่อไม่ให้มีผลกระทบที่เกิดจากความต้านทานรวมที่ขาเกตต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ รูปที่ 9.13 วงจรสมมุติในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายเกตร่วมที่มีวงจรวินแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 9.12 วงจรขยายเกตร่วมที่มีวงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



รูปที่ 9.13 วงจรสมมูลใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ของวงจรขยายเกตร่วม

ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบเกตซึ่งก็จะมีขั้นตอนคล้ายๆกันกับการวิเคราะห์หาค่าต่างๆในวงจรขยายแบบซอร์่วมและแบบเดรนร่วม อันดับแรกเราต้องทำการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis ในวงจรก่อนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.7

ตารางที่ 9.7 สรุปสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
$R_{Th} = \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเกต

$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเกต dc
$I_D = K_n (V_{GS} - V_{GS(Th)})^2$	กระแสที่ขาเดรน dc (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$	กระแสที่ขาเดรน dc กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)
$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อเฉพาะ R_D)

จากสมการการหาค่าทรานสคอนดักแตนซ์ $g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9.19

$$A_v = g_m R_D \tag{9.19}$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งอินพุตของวงจรไบแอสคงที่ รูปที่ 9.13 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \tag{9.20}$$

ค่าความต้านทานรวมฝั่งเอาต์พุต

กรณีไม่มี R_L

$$R_{out} = R_D \tag{9.21ก}$$

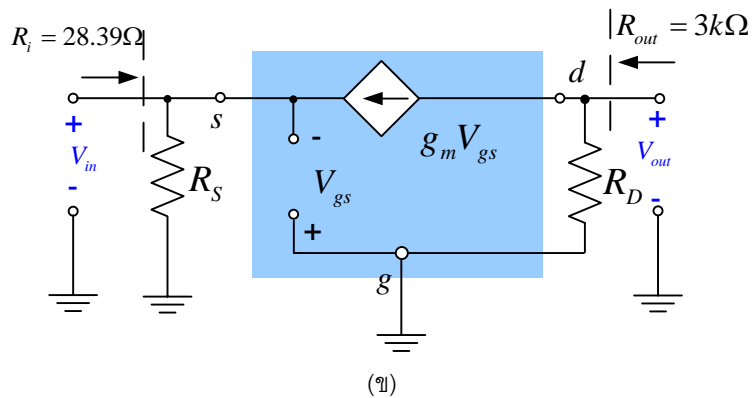
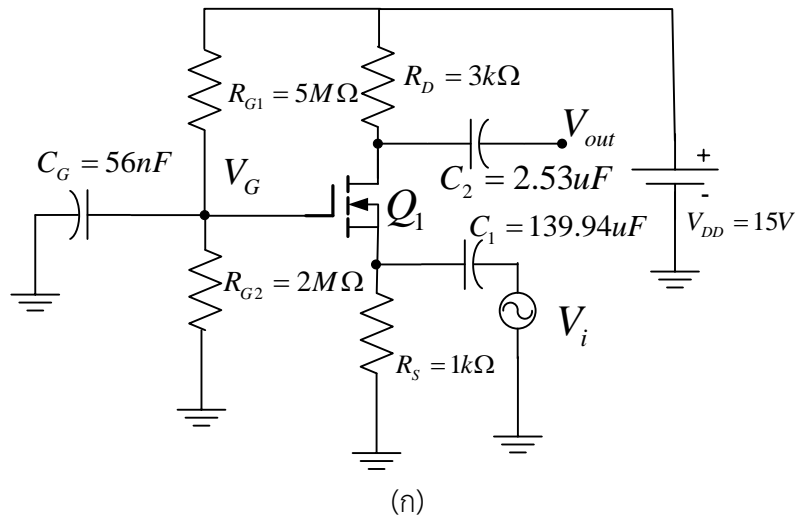
กรณีมี R_L

$$R_{out} = R_D \parallel R_L \tag{9.22ข}$$

ตัวอย่างที่ 9.4 จากวงจรในรูปที่ 9.14 จงคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 ขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาเกต C_G

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าแบบ มีค่า $V_{GS(Th)}=1\text{ V}$, $K_n=100\text{ mA/V}^2$ และ V_i ทำงานในย่านความถี่เสียง 20Hz-20kHz มีค่าแอมพลิจูด 10 mV_{p-p}



รูปที่ 9.14 (ก) วงจรขยายข้อสร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย์

ตารางที่ 9.8 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$	ตัวต้านทานเสมือนที่ขาเกต	1.428MΩ

$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$	<p>แรงดันที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดันที่ขาเกต dc</p>	<p>4.28V</p>
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$ <p>หรือ</p> $I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0$ <p>*ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D</p> <p>ได้ค่า I_D มา 2 ค่าให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$</p>	<p>กระแสที่ขาเดรน dc กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S</p>	<p>2.98mA</p>
$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	<p>แรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอส (กรณีวงจรที่ต่อ R_D และ R_S)</p>	<p>3.08 V</p>

ตารางที่ 9.9 การวิเคราะห์ ac analysis

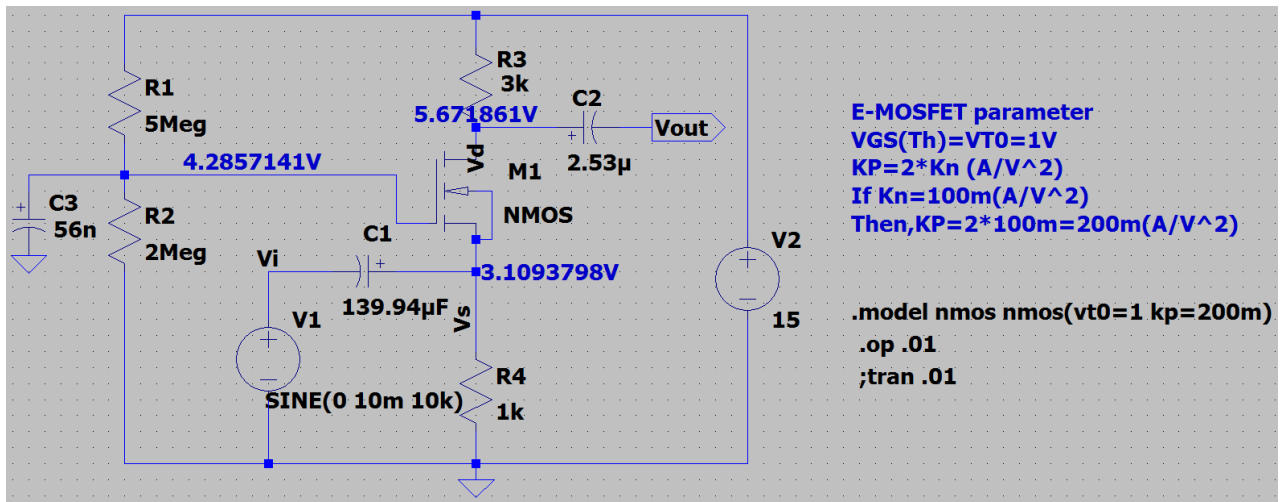
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	35.2mA/V
$A_v \cong g_m R_D$	อัตราขยายแรงดัน	105.6
$R_{in} = \frac{1}{g_m}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	28.39 Ω
$R_{out} = R_D$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	3k Ω
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ยานความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	7.95×10^{-3}
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_{in}}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า	139.94 μF

$C_2 = \frac{\tau}{R_D + R_L}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	$2.53 \mu F$
$X_{C_G} = \frac{R_{Th}}{10} = 142.8k$ $C_G = \frac{1}{2\pi f X_{C_s}}$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาเกต (ใช้หลักการเดียวกันกับการหาตัวเก็บประจุบายพาสที่ขา ซอสของวงจรขยายแบบซอสรวม)	$55.67 \mu F$

เพื่อตรวจสอบคำตอบ เราสามารถใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรโดยการต่อวงจรในรูปที่ 9.15(ก) โดยเราจะใช้ NMOS ซึ่งจะต้องเพิ่มรายละเอียดของโมเดลดังนี้ ค่า v_{t0} คือค่า $V_{GS(th)}$ ค่า $k_p = 2 \times K_n$ ยกตัวอย่างเช่น $K_n = 100mA/V^2$ จะได้ค่า $k_p = 2 \times (100 \times 10^{-3}) = 200mA/V^2$

.model nmos nmos(vt0=1 kp=200m)

ส่วนรูปที่ 9.15(ข) แสดงผลการจำลองในส่วนของ dc และเมื่อเทียบกับการคำนวณพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน dki จำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient) จะพบว่าเมื่อจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์ซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $10mV_{p-p}$ ความถี่ 1 kHz จะได้สัญญาณเอาต์พุตซึ่งมีค่าแอมพลิจูด $1.03V_{p-p}$ ความถี่ 10 kHz และมีเดียวกันแสดงในรูป 9.15(ค) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราขยายแรงดันที่ได้จากการคำนวณ

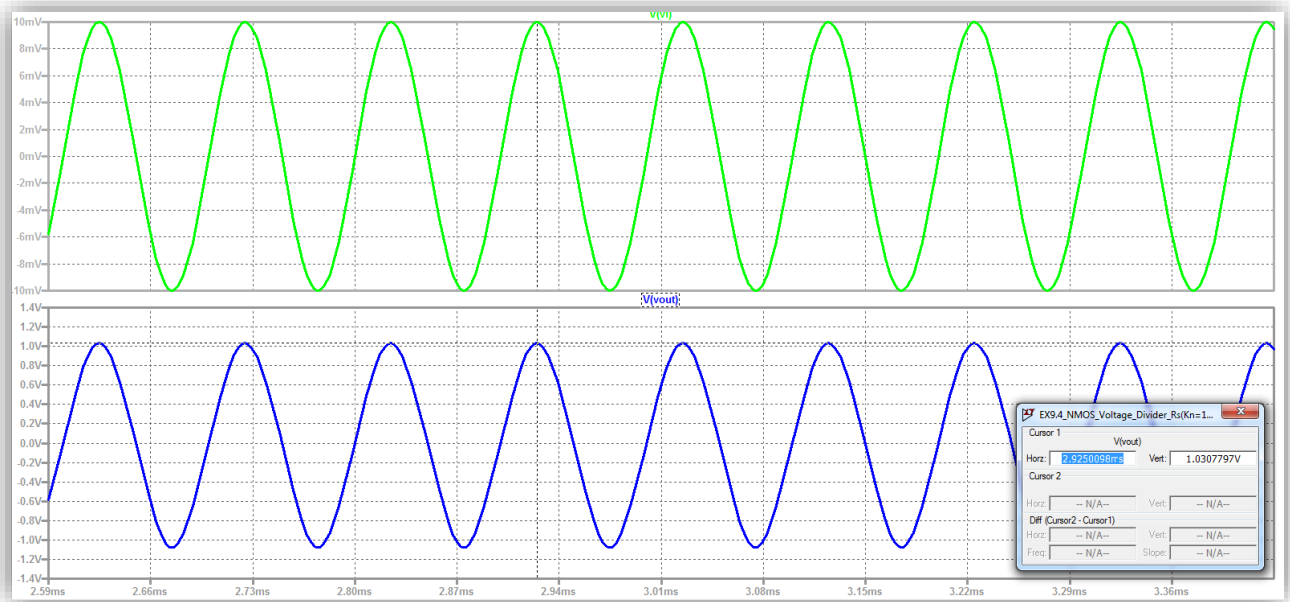


(ก)


```

--- Operating Point ---
V(vd) :      5.67186      voltage
V(n002) :    4.28571      voltage
V(vs) :      3.10938      voltage
V(n001) :    15          voltage
V(vi) :      0           voltage
V(vout) :    9.01824e-006 voltage
Id(M1) :    0.00310939    device_current
Ig(M1) :    0            device_current
Ib(M1) :   -2.57248e-012  device_current
Is(M1) :   -0.00310939    device_current
I(C3) :     2.4e-019      device_current
I(C2) :     9.01824e-018  device_current
I(C1) :     4.35127e-016  device_current
I(R4) :     0.00310938    device_current
I(R3) :     0.00310938    device_current
I(R2) :     2.14286e-006  device_current
I(R1) :     2.14286e-006  device_current
I(V1) :     4.35127e-016  device_current
I(V2) :    -0.00311152    device_current
    
```

(ข)



(ค)

รูปที่ 9.15(ก) วงจรที่ใช้ในการจำลอง (ข)ผลการจำลองในส่วนของ dc (ค)ผลการจำลองดูค่าชั่วขณะ (Transient)

ตาราง 9.10 สรุปคุณลักษณะของวงจรขยายสัญญาณของทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าMOSFETทั้ง 3

แบบ

พารามิเตอร์	ขอสรวม Common Source	เดรนรวม Common Drain	เกตรวม Common Gate
อัตราขยายแรงดัน A_v	สูง	ต่ำ	สูง
ความต้านทานรวมขาเข้า R_{in}	ต่ำ	สูง	ต่ำมาก
ความต้านทานรวมขาออก R_{out}	สูง	ต่ำมาก	สูง
เฟสของการขยายสัญญาณ	กลับเฟส	ไม่กลับเฟส	ไม่กลับเฟส

เอกสารอ้างอิง

1. Thomas L. Floyd, Electronic devices 9th edition Merrill, 1992
2. Boylestad, Robert L., and Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory 7th Edition. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1978.
3. Fernandez-Canque, H.L., Analog Electronics Applications: Fundamentals of Design and Analysis, CRC Press, 2016.
4. Donald A. Neamen. Microelectronics. Circuit Analysis and Design 4th Edition, 2010
5. <https://studylib.net/doc/18208291/nmos-examples>

ใบงานที่ 9. วงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

- 1.1 เพื่อให้เข้าใจเพื่ออธิบายการทำงานของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า
- 1.2 เพื่อศึกษาการคำนวณ การจำลอง และการทดลองจริงของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า
- 1.3 สามารถใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าและสามารถเทียบกับการทดลองจริงได้

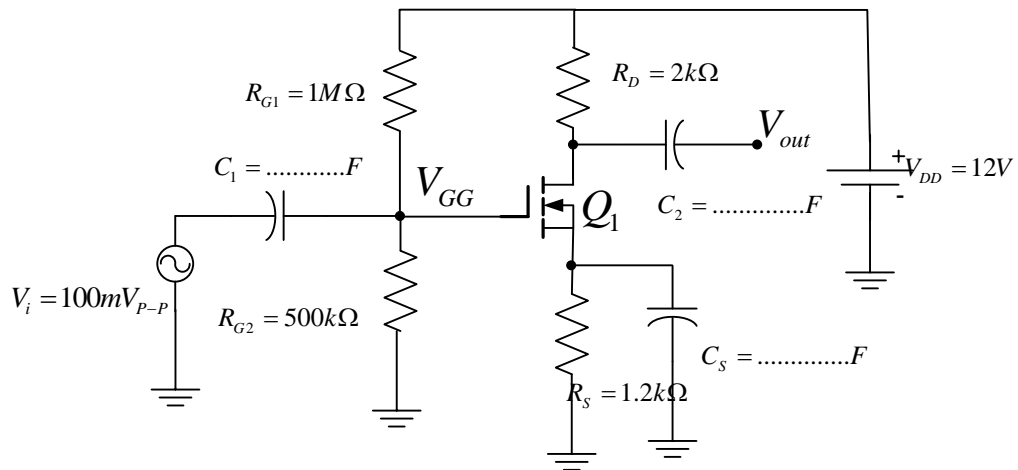
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. ซอฟต์แวร์ LTspice version XVII
3. ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า MOSFET เบอร์ VN2222LL 1 ตัว
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
5. แอมป์มิเตอร์ 2 ตัว
6. โวลต์มิเตอร์
7. ออสซิลโลสโคป
8. ตัวต้านทาน $500\text{k}\Omega$, $1\text{M}\Omega$, $1.5\text{M}\Omega$, $2\text{k}\Omega$, $1.2\text{k}\Omega$, $4\text{k}\Omega$
9. อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ

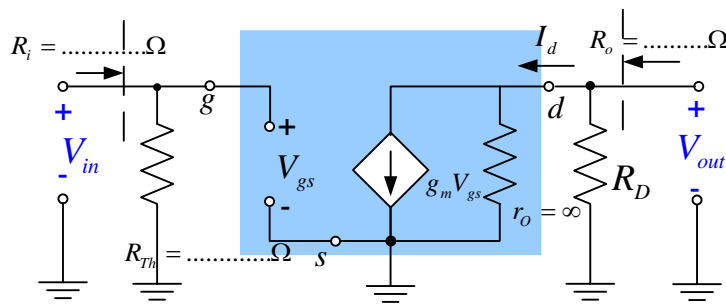
การทดลองที่ 9.1 จากวงจรในรูปที่ 9.16 จงคำนวณหาค่าต่างๆพร้อมกับจำลองและทดลองจริงดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุคัปปลิงขาเข้า C_1 ขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาส C_s

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.6 \text{ V}$, $K_n = 100 \text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0$ และ V_i เป็นสัญญาณ Sine ความถี่ 1 kHz มีค่าแอมพลิจูด 100 mV_{p-p}



(ก)



(ข)

รูปที่ 9.16 (ก) วงจรขยายซอร์สรวมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย์

ตารางที่ 9.11 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$			
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$			
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$ <p>หรือ</p> $I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0$ <p>*ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D</p> <p>ได้ค่า I_D มา 2 ค่าให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$</p>			
$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$			

ตารางที่ 9.12 การวิเคราะห์ ac analysis

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	
$A_v \cong -g_m R_D$	อัตราขยายแรงดัน	
$R_{in} = R_{G1} \parallel R_{G2}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	
$R_{out} = R_D$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ย่านความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_{in}}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า	
$C_2 = \frac{\tau}{R_D + R_L}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	

$X_{C_s} = \frac{R_s}{10} = \dots\dots\dots$ $C_s = \frac{1}{2\pi fX_{C_s}}$	ตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาซอส	
--	----------------------------	--

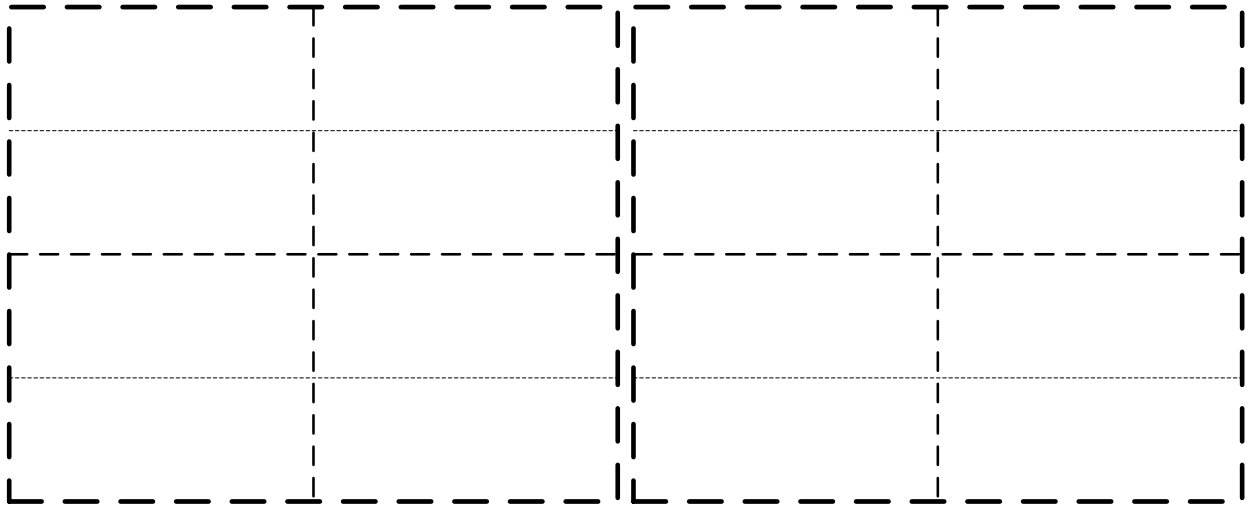
เพื่อตรวจสอบคำตอบจึงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรโดยการต่อวงจรในรูปที่ 9.16(ก) โดยใช้ NMOS โดยใช้ Spice Model ของมอสเฟตเบอร์ VN222LL ที่ให้มาแล้วsaveใน Notepad ชื่อไฟล์ VN222LL.txt จากนั้นใช้ SPICE Directive (.include VN222LL.txt)

```
.include VN222LL.txt
```

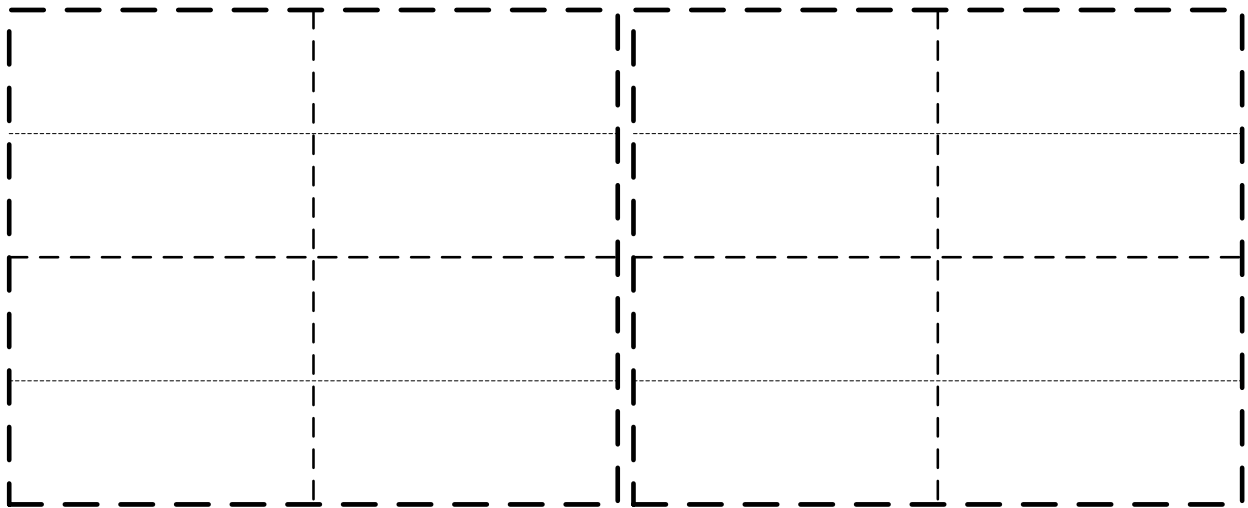
Spice Model ของมอสเฟตเบอร์ VN222LL

```
.MODEL VN222LL NMOS (LEVEL=3 RS=0.205 NSUB=1.0E15
+DELTA=0.1 KAPPA=0.0506 TPG=1 CGDO=3.1716E-9
+RD=0.439 VTO=1.600 VMAX=1.0E7 ETA=0.0223089
+NFS=6.6E10 TOX=1.0E-7 LD=1.698E-9 UO=862.425
+XJ=6.4666E-7 THETA=1.0E-5 CGSO=9.09E-9 L=2.5E-6
+W=0.8E-2)
.ENDS
```

9.1.2 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 9.16 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และ สัญญาณ V_{out}



9.1.1 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 9.16 โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



สรุปผลการทดลอง

.....

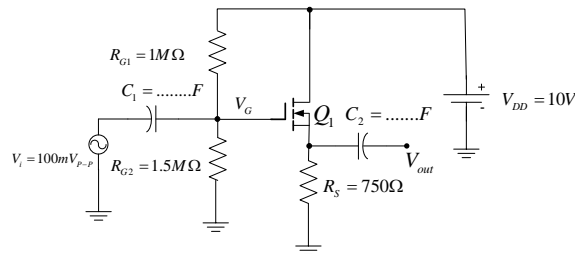
.....

.....

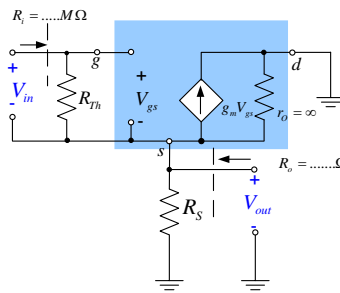
การทดลองที่ 9.2 จากวงจรในรูปที่ 9.17 จงคำนวณหาค่าต่างๆพร้อมทั้งจำลองและทดลองจริงดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุค่านขาเข้า C_1 ขาออก C_2

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.6 \text{ V}$, $K_n = 100 \text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0$ และ V_i เป็นสัญญาณ Sine ความถี่ 1 kHz มีค่าแอมพลิจูด 100 mV_{p-p}



(ก)



(ข)

รูปที่ 9.17 (ก) วงจรขยายเดรนร่วมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย์

ตารางที่ 9.13 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$R_{Th} = \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$			
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \right) V_{DD}$			
$I_D = K_n (V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$			

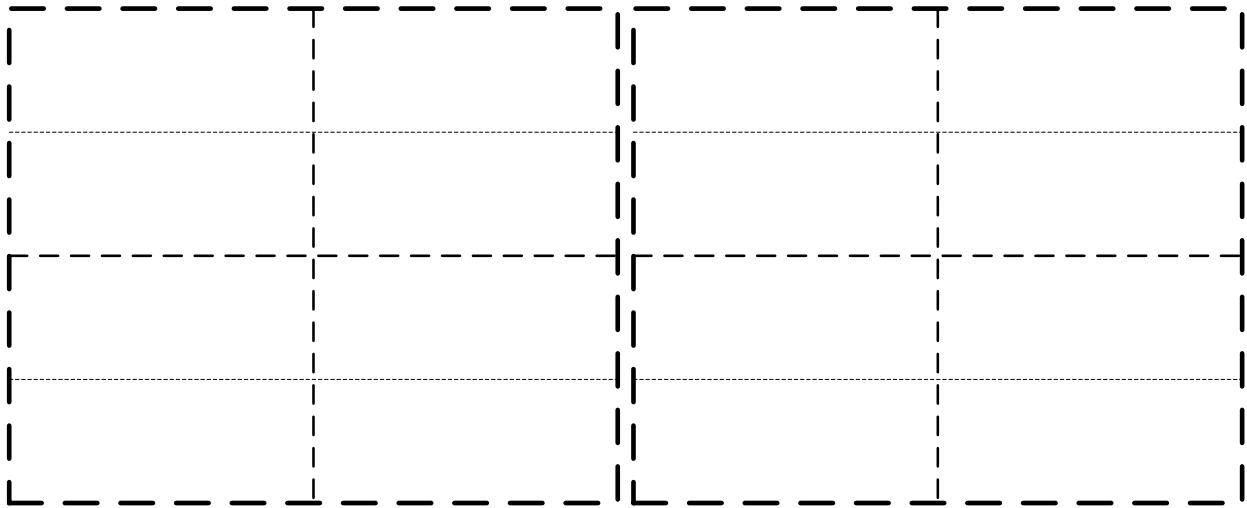
$I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2 \frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S} \right] I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S} \right]^2 = 0$ <p>*ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D</p> <p>ได้ค่า I_D มา 2 ค่า ให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$</p>			
$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S$			

ตารางที่ 9.14 การวิเคราะห์ ac analysis

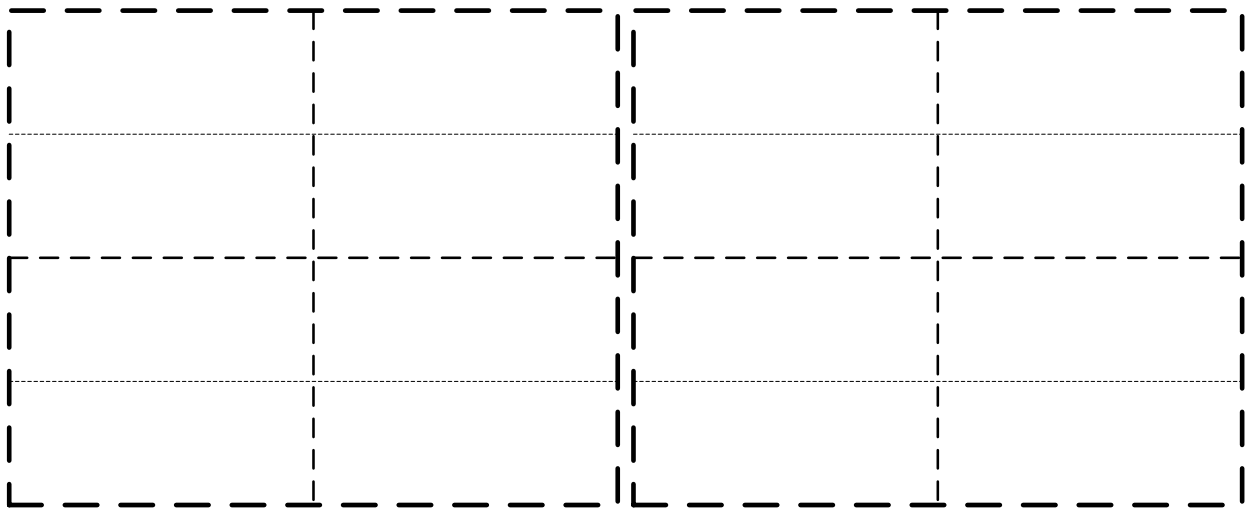
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	
$A_v \cong \frac{R_S}{\frac{1}{g_m} + R_S}$	อัตราขยายแรงดัน	
$R_m = R_{G1} \parallel R_{G2}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	
$R_{out} = R_S \parallel \frac{1}{g_m}$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ย่านความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_m}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า	
$C_2 = \frac{\tau}{R_S \parallel \left(\frac{1}{g_m} \right)}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	

เพื่อตรวจสอบคำตอบจริงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรโดยการต่อวงจรในรูปที่ 9.17(ก) โดยใช้ NMOS โดยใช้ Spice Model ของมอสเฟตเบอร์ VN222LL ที่ให้มาแล้ว save ใน Notepad ชื่อไฟล์ VN222LL.txt จากนั้นใช้ SPICE Directive (.include VN222LL.txt)

9.2.1 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 9.17 พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



9.2.2 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 9.17 โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



สรุปผลการทดลอง

.....

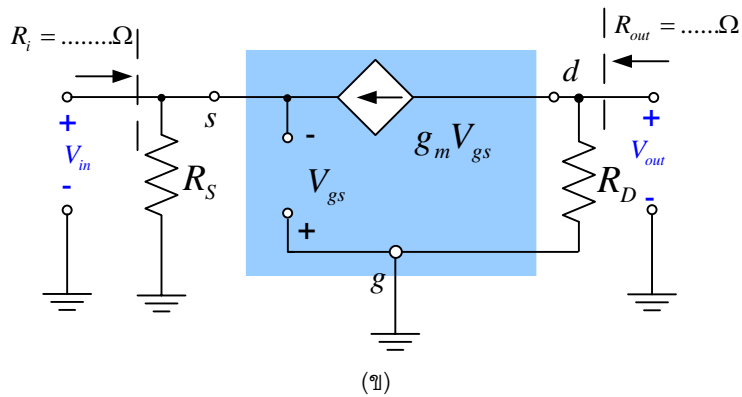
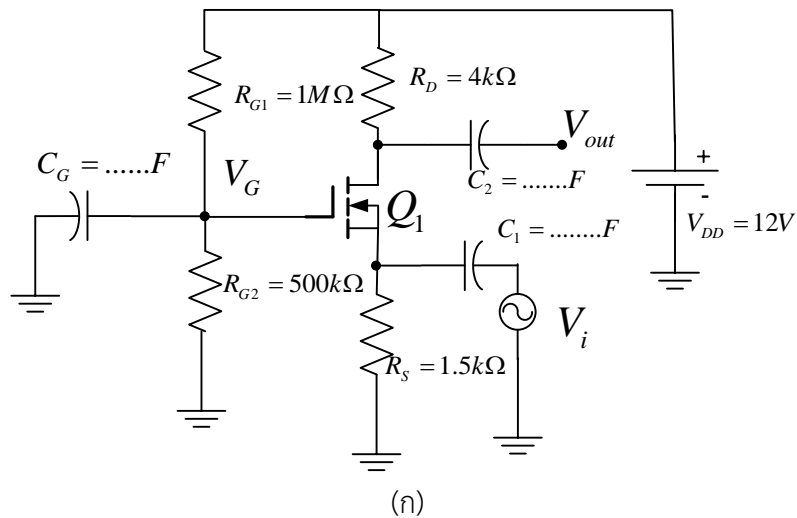
.....

.....

การทดลองที่ 9.3 จากวงจรในรูปที่ 9.18 จงคำนวณหาค่าต่างๆพร้อมกับจำลองและทดลองจริงดังต่อไปนี้

1. อัตราขยาย A_v
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ R_{in}
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ R_{out}
4. ตัวเก็บประจุต้านขาเข้า C_1 ขาออก C_2 และตัวเก็บประจุบายพาส C_G

โดยกำหนดให้ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN2222LL มีค่า $V_{GS(Th)} = 1.6 \text{ V}$, $K_n = 100 \text{ mA/V}^2$, $\lambda = 0$ และ V_i เป็นสัญญาณ Sine ความถี่ 1 kHz มีค่าแอมพลิจูด 50 mV_{P-P}



รูปที่ 9.18 (ก) วงจรขยายซอร์สรวมที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (ข) วงจรสมมูลย์

ตารางที่ 9.15 การวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง dc analysis

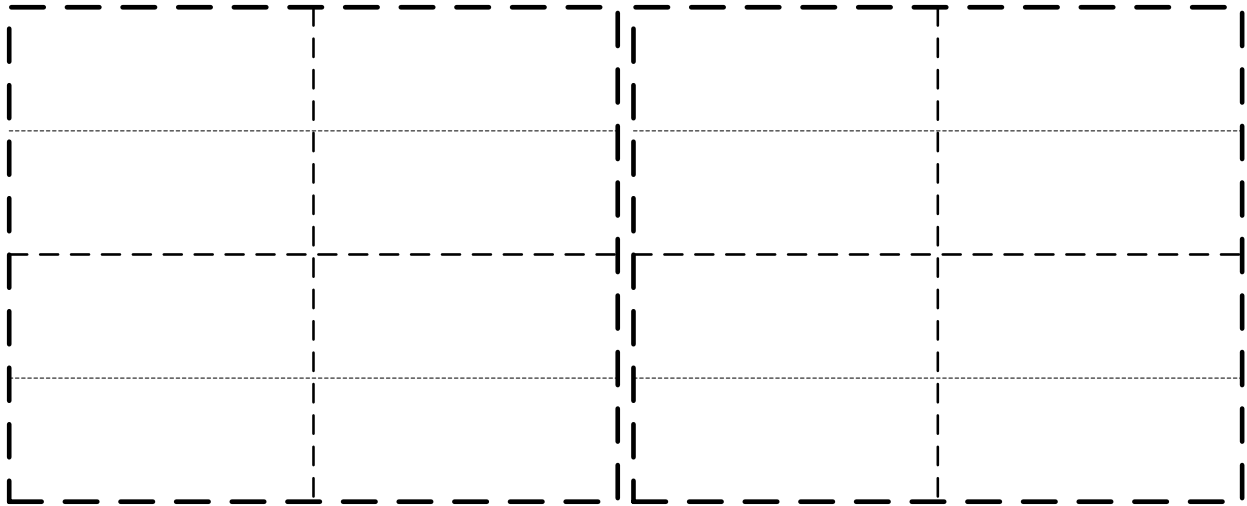
พารามิเตอร์	คำนวณ	จำลอง	วัดจริง
$R_{Th} = \frac{R_{G1}R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}$			
$V_G = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}\right)V_{DD}$			
$I_D = K_n(V_G - I_D R_S - V_{GS(Th)})^2$ หรือ $I_D^2 - \left[\frac{1}{K_n R_S^2} + 2\frac{(V_G - V_{GS(Th)})}{R_S}\right]I_D + \left[\frac{V_G - V_{GS(Th)}}{R_S}\right]^2 = 0$ *ใช้สมการ $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ หาค่า I_D ได้ค่า I_D มา 2 ค่า ให้เลือกค่าที่ทำให้เงื่อนไขการทำงานของ MOSFET เป็นไปตามทฤษฎี $V_G - V_S \geq V_{GS(Th)}$			
$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S)$			

ตารางที่ 9.16 การวิเคราะห์ ac analysis

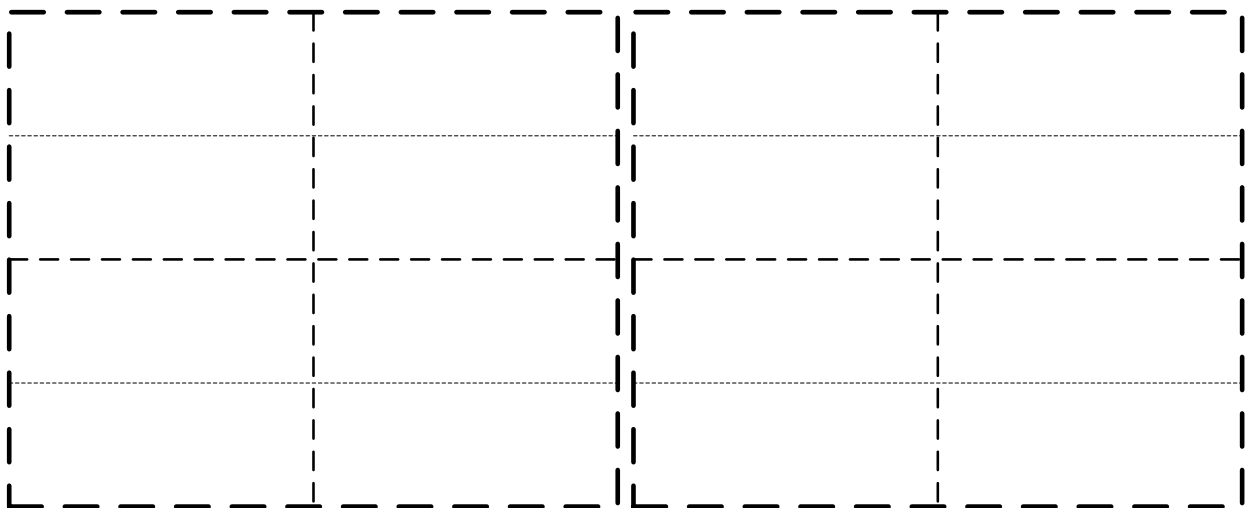
พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าที่คำนวณได้
$g_m = 2\sqrt{K_n I_D}$	ค่าทรานสคอนดักแตนซ์	
$A_v \cong g_m R_D$	อัตราขยายแรงดัน	
$R_{in} = \frac{1}{g_m}$	อินพุตอิมพีแดนซ์	
$R_{out} = R_D$	เอาต์พุตอิมพีแดนซ์	
$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	ค่าคงที่ทางเวลาโดยคิดที่ยานความถี่ใช้งานต่ำสุด (20Hz)	
$C_1 = \frac{\tau}{R_i + R_{in}}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาเข้า	
$C_2 = \frac{\tau}{R_D + R_L}$	ตัวเก็บประจุฝั่งขาออก	

$X_{C_G} = \frac{R_{Th}}{10} = \dots\dots\dots$ $C_G = \frac{1}{2\pi f X_{C_s}}$	<p>ตัวเก็บประจุบายพาสที่ขาเกต (ใช้หลักการเดียวกันกับการหาตัวเก็บประจุบายพาสที่ขา ซอสของวงจรขยายแบบซอสร่วม)</p>	
--	--	--

9.3.1 จงใช้โปรแกรม LTspice จำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 9.18(ก) พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



9.3.2 จงทำการต่อเพื่อทดลองจริงจากวงจรในรูปที่ 9.18 โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าเบอร์ VN222LL พร้อมวาดกราฟสัญญาณอินพุต V_{in} และสัญญาณ V_{out}



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....