

โครงสร้างและการออกแบบกระเจกต้นแบบสำหรับ ช็อตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ Structure and Mask Design for 3D RESURF Schottky Diode

พีรศักดิ์ จันทรงาม (Peerasak Chantngarm)^{1*}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างช็อตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ ซึ่งโครงสร้างรีเซฟ 3 มิตินี้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มแรงดันพังทลายให้สูงกว่าโครงสร้างรีเซฟ 2 มิติ ด้วยการเพิ่มโครงสร้างเรียงสลับระหว่างช็อตต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-ดริฟต์ (n-drift Schottky diode) และช็อตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-ดริฟต์ (p-drift Schottky diode) ตามแนวราบ นอกจากนี้เราได้ทำการจำลองกระบวนการสร้าง และออกแบบกระเจกต้นแบบสำหรับการสร้างอุปกรณ์จริงต่อไปในอนาคต ซึ่งการจำลองกระบวนการสร้างทำให้เราทราบถึงเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการสร้าง เพื่อให้ได้การกระจายตัวของสารเจือที่เหมาะสมตามเงื่อนไขของโครงสร้างรีเซฟ รวมทั้งได้ทำการจำลองกระบวนการสร้างสำหรับโครงสร้างเรียงสลับของชั้น p^+ และชั้น n^+ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติ นอกจากนี้เราได้มีการนำเสนอแนวคิดใหม่ๆในการออกแบบกระเจกต้นแบบ เช่นใช้โครงสร้างแบบลู่วิ่งเพื่อการเรียงสลับระหว่างช็อตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-ดริฟต์กับชนิดเอ็น-ดริฟต์ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้โครงสร้างช็อตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิตินี้มีแรงดันพังทลายที่สูงขึ้น

Abstract

This paper presents a 3D RESURF Schottky diode structure which is known to have a higher breakdown voltage than that of the conventional 2D RESURF structure. This has been done by adding an alternative pattern of the n-drift Schottky diode and the p-drift Schottky diode in the horizontal direction. In addition, a process simulation has been done, and the masks have been designed for the fabrication of real devices in the future. The simulation results suggest the optimized fabrication process conditions in order to obtain the appropriate dopant distribution required for the realization of the RESURF structure. A process simulation has also been done for a p^+/n^+ alternative pattern which is the important part of 3D RESURF structures. Several new ideas, such as using a racetrack structure to facilitate the smooth alternative pattern of the n-drift and p-drift Schottky diodes, have been introduced in the mask design. The goal of the mask design is to further increase the breakdown voltage of this 3D RESURF Schottky diode structure.

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
*Correatunding 8uthor, e-mail: cpeerasak@yahoo.com

คำสำคัญ: รีเซฟ 3 มิติ, ซ็อกเก็ตซีไอโอเด, การออกแบบกระจกต้นแบบ

Keywords: 3D RESURF, Schottky diode, mask design

บทนำ

วงจรรวมเป็นแนวโน้มที่สำคัญอย่างหนึ่งทางอิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีด้านวงจรรวมประเภทกำลัง (power integrated circuit) นับเป็นสิ่งหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าในงานประยุกต์ต่างๆ โดยเฉพาะในงานประยุกต์ที่ใช้กำลังช่วง 1 วัตต์ ถึง 1 กิโลวัตต์ เช่น ในแหล่งจ่ายไฟของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ทางสารสนเทศต่างๆ หรือใช้ในหน่วยควบคุมมอเตอร์ของรถยนต์และเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านชนิดต่างๆ (Udrea, 2002) ซึ่งภายในวงจรรวมประเภทกำลังนั้น จะรวมเอาทั้งสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลัง วงจรควบคุม และวงจรอื่นๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดยมีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

โครงสร้างรีเซฟ (RESURF) เป็นโครงสร้างที่มีจุดเด่นหลายประการเช่น ความกว้างของเขตปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อที่จะเกิดการพังทลาย จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในโครงสร้างทั่วไป ทำให้มีแรงดันพังทลายที่สูงกว่า อีกทั้งยังมีความต้านทานสถานะออน (on-resistance) ที่ต่ำกว่า และมีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในวงจรรวม (Appels and Vaes, 1979; Ludikhuizen, 2000) ทำให้เป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังชนิดต่างๆ และถูกนำไปใช้ในวงจรรวมประเภทกำลังอย่างแพร่หลาย นับตั้งแต่ถูกคิดค้นขึ้นมาในปี 1979 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระยะประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา เช่น ใช้กับ LD-MOSFET (Khemka, et al., 2003; Xie and Han, 2001) หรือใช้กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นนอกเหนือจากซิลิคอน (Noborio, et al., 2007; Karmalkar, et al., 2001)

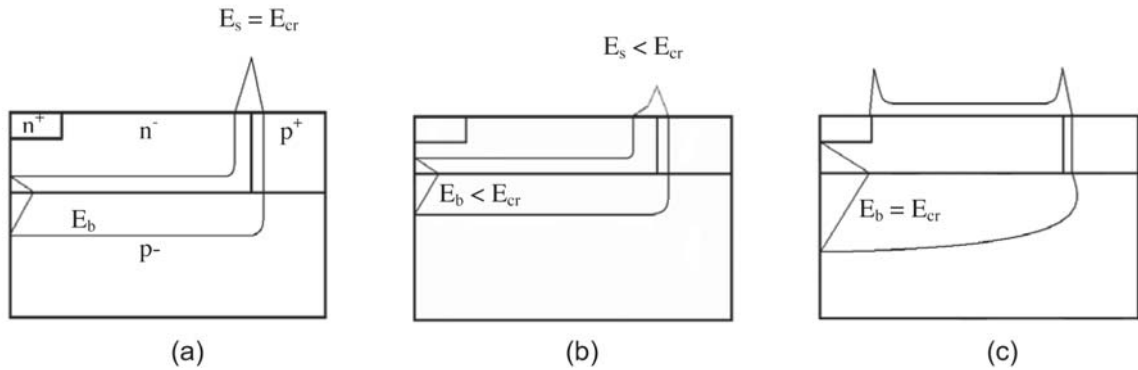
นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มใหม่ที่นำเสนออีกประการหนึ่ง ในการพัฒนาทำให้โครงสร้างรีเซฟมีแรงดันพังทลายที่สูงขึ้นไปอีก โดยการเพิ่มรอยต่อของโครงสร้างรีเซฟเข้าไปอีก 1 มิติ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้ความกว้างของเขตปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นเร็วขึ้นอีก โครงสร้างชนิดใหม่นี้ได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรก โดยกลุ่มของ F. Udrea โดยใช้ชื่อว่าโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติ จากผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์พบว่าโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติ มีแรงดันพังทลายที่สูงกว่า (Udrea et al., 1998) และมีคุณสมบัติด้าน RF ที่ดีกว่า (Pathirana et al., 2003) เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรีเซฟ 2 มิติ ซึ่งตามทฤษฎีจะทำให้แรงดันทลายสูงขึ้นประมาณ 5 เท่า และความต้านทานสถานะออนลดลงประมาณ 5 เท่าเช่นเดียวกัน (Udrea et al., 1998)

โครงสร้างรีเซฟ 3 มิติที่กลุ่มของ F. Udrea นำเสนอนั้น มีลักษณะเด่นคือใช้ฐานรองแบบ SOI ซึ่งแม้ว่าจะมีคุณสมบัติในการแยกโดตที่ดี แต่ก็จะทำให้รีเซฟที่ได้บิดเบือนไปจากโครงสร้างรีเซฟพื้นฐาน (Appels and Vaes, 1979) โดยกลุ่มของ F. Udrea แก้ไขปัญหานี้ด้วยการปรับความหนาแน่นของสารเจือในแต่ละชั้น หรือความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างให้เหมาะสม ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้การออกแบบกระบวนการสร้างยุ่งยากและควบคุมผลลัพธ์ที่ได้ยากขึ้น เนื่องจากต้องหาเงื่อนไขความหนาแน่นของสารเจือ และความหนาของชั้นสารที่เหมาะสม นอกจากนี้ กลุ่มของ F. Udrea ได้มีการนำเสนอโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติเฉพาะส่วนที่สำคัญเท่านั้น จึงยังไม่สามารถสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ เนื่องจากประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งของโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติคือ จะต้องมีการเรียงสลับกันอย่างต่อเนื่อง ของชั้นรีเซฟชนิดพีและชั้นรีเซฟชนิดเอ็นตลอดทั้งโครงสร้าง

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ เป็นการพัฒนาโครงสร้างซ็อกเก็ตซีไอโอเดเบรซีเฟ 3 มิติชนิดใหม่ ต่อจากโครงสร้างรีซีเฟ 3 มิติ ของกลุ่ม F. Udrea โดยเป็นใช้หลักการเดียวกับโครงสร้างดับเบิลเกตดีมอสเฟตแบบรีซีเฟ 3 มิติชนิดใหม่ (พีรศักดิ์, 2551) และ โครงสร้างพี-เอ็นไอโอเดเบรซีเฟ 3 มิติชนิดใหม่ (พีรศักดิ์, 2551) ที่ผู้เขียนได้นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์เพื่อประยุกต์ใช้งานจริงได้ง่ายขึ้น และมีแรงดันพังทลายที่สูงขึ้น กล่าวคือได้พัฒนาให้เป็นโครงสร้างที่มีกระบวนการสร้างง่ายไม่ซับซ้อน เช่น ใช้การแยกโคดด้วยรอยต่อ (junction isolation) แทน SOI แม้ว่าจะมีคุณสมบัติในการแยกโคดที่ด้อยกว่า รวมทั้งได้ออกแบบโครงสร้างให้มีชั้นเดรนเอ็กเทนชัน (drain extension) และมีฟิลด์เพรต (field plate) เป็นต้น นอกจากนี้ งานวิจัยชิ้นนี้ยังได้ทำการจำลองกระบวนการสร้าง อีกทั้งทำการออกแบบกระจกต้นแบบ เพื่อประโยชน์ในการสร้างอุปกรณ์จริงต่อไปในอนาคต โดยให้รีซีเฟ 3 มิติ มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบลู่วิ่ง เพื่อการเรียงสลับที่ต่อเนื่องกันของชั้นรีซีเฟชนิดพีและชั้นรีซีเฟชนิดเอ็น เนื้อหาของบทความฉบับนี้ประกอบด้วย ทฤษฎีพื้นฐานของโครงสร้างรีซีเฟโดยทั่วไปในหัวข้อที่ 2 โครงสร้างและหลักการทำงานของซ็อกเก็ตซีไอโอเดเบรซีเฟ 3 มิติ ในหัวข้อที่ 3 การจำลองกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 4 การออกแบบกระจกต้นแบบในหัวข้อที่ 5 โดยในแต่ละหัวข้อได้มีการอภิปรายรวมอยู่ด้วย และสรุปในหัวข้อที่ 6

ทฤษฎีพื้นฐานของโครงสร้างรีซีเฟ

รีซีเฟ (RESURF) มาจากคำว่า REduced SURface Field โดยรูปที่ 1 แสดงถึงรูปหน้าตัดของโครงสร้างแบบรีซีเฟ 2 มิติ และสนามไฟฟ้าในกรณีที่มีความหนาของชั้นเอพิตาซี (epitaxy) และแรงดันไบแอสแตกต่างกัน (Appels and Vaes, 1979) ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างแบบรีซีเฟนี้มีรอยต่อที่สำคัญอยู่ 2 รอยต่อ คือในแนวตั้งจะเป็นรอยต่อระหว่าง n^- กับ p^+ ส่วนในแนวนอนจะเป็นรอยต่อระหว่าง n^- กับ p^- ในรูปที่ 1 (a) เป็นกรณีที่ชั้นเอพิตาซี n^- หนาทำให้เขตปลอดพาหะของรอยต่อแนวตั้ง ไม่ได้ได้รับผลกระทบใดๆจากเขตปลอดพาหะของรอยต่อแนวนอน ดังนั้นแรงดันพังทลายจึงถูกกำหนดด้วยสนามไฟฟ้า E_s ที่รอยต่อ p^+/n^- ในแนวตั้งเมื่อสนามไฟฟ้า E_s มีค่าเท่ากับสนามวิกฤต (critical field) E_{cr} โดยค่าสนามวิกฤตคือค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ รูปที่ 1 (b) เป็นกรณีที่ชั้นเอพิตาซี n^- บางลง ทำให้เขตปลอดพาหะของรอยต่อแนวตั้ง p^+/n^- กว้างขึ้นจากผลกระทบของเขตปลอดพาหะของรอยต่อแนวนอน n^-/p^- ทำให้สนามไฟฟ้า E_s ที่แรงดันไบแอสเดียวกับแรงดันพังทลายในรูปที่ 1 (a) มีค่าน้อยกว่าสนามวิกฤต E_{cr} กล่าวคือทำให้มีแรงดันพังทลายสูงกว่าในรูปที่ 1 (a) โดยในกรณีนี้การพังทลายจะเกิดขึ้นที่รอยต่อแนวนอนเมื่อสนามไฟฟ้า E_s มีค่าเท่ากับสนามวิกฤต E_{cr} ดังรูปที่ 1(c) แต่ในกรณีที่ความหนาของชั้นเอพิตาซีบางมาก จนเมื่อได้รับแรงดันไบแอสแล้วเกิดเขตปลอดพาหะทั่วทั้งชั้นเอพิตาซี n^- จะทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่าง n^+/n^- มีความเข้มมากขึ้น ดังนั้นหากชั้นเอพิตาซีบางมากเกินไป จะทำให้เกิดการพังทลายขึ้นที่รอยต่อ n^+/n^- นี้แทน ซึ่งจะทำให้แรงดันพังทลายของโครงสร้างรีซีเฟต่ำลง (Appels and Vaes, 1979)



รูปที่ 1. รูปหน้าตัดของโครงสร้างแบบรีเซฟ (a) กรณีที่ชั้นเอพิตาซีหนา (แรงดันไบแอส 370 V) (b) กรณีที่ชั้นเอพิตาซีบาง (แรงดันไบแอส 370 V) (c) กรณีที่ชั้นเอพิตาซีบาง (แรงดันไบแอส 1150 V)

สิ่งที่สำคัญ สำหรับโครงสร้างแบบรีเซฟคือ ความหนาของชั้นเอพิตาซี n^- และความหนาแน่นของสารเจือในชั้นเอพิตาซีซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นรีเซฟ (RESURF layer) จากการคำนวณแบบ 2 มิติ ในกรณีที่ผลคูณของค่าทั้งสองมีค่าประมาณ 10^{12} cm^{-2} จะทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวด้านบน คือที่รอยต่อ n^+/n^- และ p^+/n^- มีความสมมาตรดังในรูปที่ 1 (c) ทำให้ได้โครงสร้างรีเซฟที่มีแรงดันพังทลายสูงสุด (Appels and Vaes, 1979)

ซอตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ

จากคุณลักษณะเด่นคือมีแรงดันพังทลายสูง ความต้านทานสถานะออนต่ำ และลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในวงจรรวม ทำให้รีเซฟได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในวงจรรวมประเภทกำลัง และในปี 1998 พวก F. Udrea ได้เสนอโครงสร้างมอสเฟตแบบรีเซฟ 3 มิติขึ้นมา โดยได้ขยายโครงสร้างรีเซฟออกไปอีก 1 มิติ ซึ่งตามทฤษฎีจะทำให้แรงดันพังทลายสูงขึ้นประมาณ 5 เท่า และจะทำให้ความต้านทานสถานะออนลดลงประมาณ 5 เท่าเช่นเดียวกัน (Udrea, Popescu, and Milne, 1998) บทความฉบับนี้นำเสนอโครงสร้างของซอตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ ซึ่งโครงสร้างของซอตต์คีย์ไดโอดนั้น ยังไม่เคยปรากฏการนำเสนอแนวคิดที่เป็นโครงสร้างแบบรีเซฟ 3 มิติมาก่อน

1. โครงสร้างของซอตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ

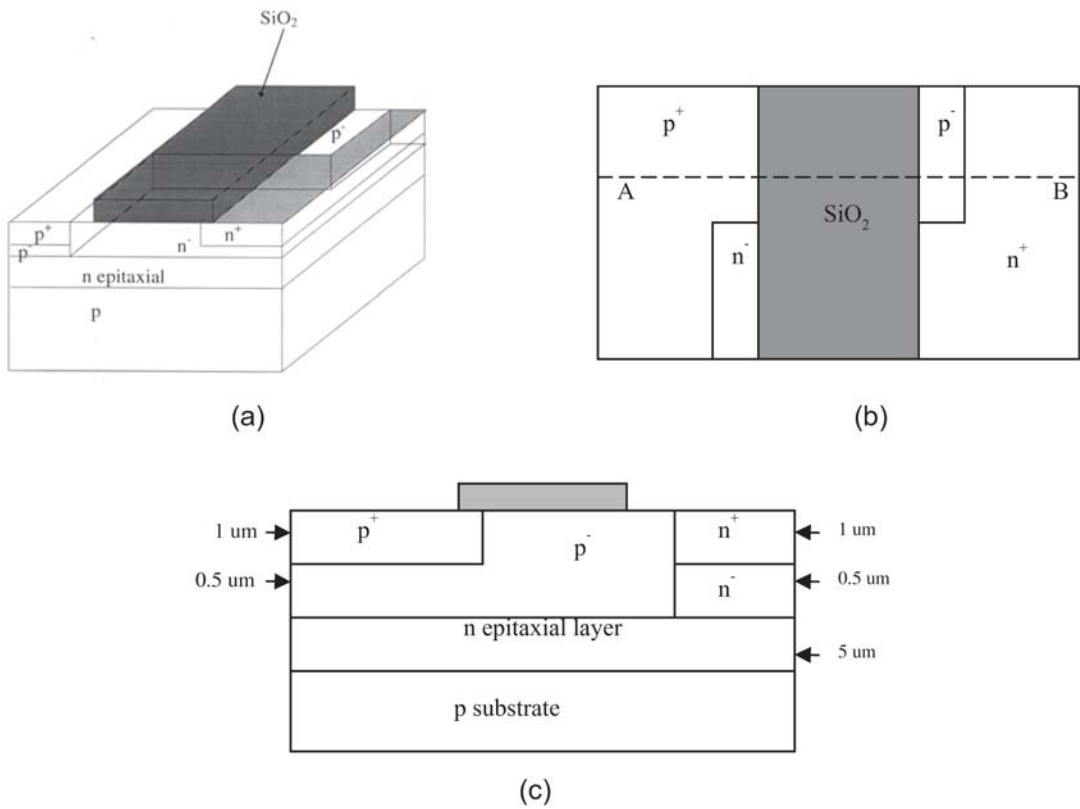
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของซอตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ โดยในรูปไม่ได้แสดงชั้นโลหะไว้ แต่เราสามารถใส่โลหะชนิดเดียวกันทั้งสำหรับรอยต่อซอตต์คีย์และรอยต่อโอห์มมิกในโครงสร้างนี้ได้ โดยการกำหนดให้ความหนาแน่นของสารเจือสูงที่รอยต่อโอห์มมิก ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์อุโมงค์ (tunneling effect) และเกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิก ในขณะที่กำหนดให้ความหนาแน่นของสารเจือต่ำที่รอยต่อซอตต์คีย์ จากภาพ 3 มิติในรูปที่ 2 (a) จะเห็นว่าซอตต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติประกอบด้วยซอตต์คีย์ไดโอด 2 ชนิดเรียงสลับกันอยู่คือ ซอตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-ดริฟต์ (p-drift Schottky diode) และซอตต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-ดริฟต์ (n-drift Schottky diode) รูปที่ 2 (b) เป็นรูปมองจากด้านบน รูปที่ 2 (c) เป็นรูปหน้าตัดของซอตต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-ดริฟต์ตามแนวเส้น AB โดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบนสุดทำหน้าที่เป็นฟิลด์ออกไซด์ (field oxide) โครงสร้างที่นำเสนอในบทความนี้ใช้แผ่นฐานรองที่มีชั้นเอพิตาซีชนิดเอ็นบนชั้นพีเพื่อการแยกโดด (isolation) (Taur and Ning, 1998) และส่วนที่เป็นชั้นรีเซฟซึ่งในที่นี้คือชั้น p^- และชั้น n^- จะทำการได้ปสารด้วยวิธีการฝังไอออนแทนการใช้ชั้นเอพิตาซีในโครงสร้างรีเซฟ 2 มิติ โดยทั่วไปแรงดันพังทลายของซอตต์คีย์ไดโอด จะถูกกำหนดด้วยความหนาแน่นของ

สารเจือในบริเวณคริฟต์ (drift region) (Sze, 1998) และในกรณีที่มีความหนาแน่นของสารเจือ ในบริเวณคริฟต์คงที่นั้น ระยะห่างระหว่างรอยต่อซีดส์คีย์กับรอยต่อโอห์มมิก ก็จะส่งผลกระทบต่อแรงดันพังทลายด้วย

2. หลักการทำงานของซีดส์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ

การทำงานของซีดส์คีย์ไดโอดทั้งชนิดพี-คริฟต์และเอ็น-คริฟต์ ใช้หลักการของโครงสร้างรีเซฟ

2 มิติเช่นเดียวกัน กล่าวคือในกรณีของซีดส์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริฟต์นั้น ชั้น p^- จะทำหน้าที่เป็นชั้นรีเซฟคือเทียบได้กับชั้นเอพิตาซีในโครงสร้างรีเซฟ 2 มิติ และในกรณีที่ชั้น p^- มีความหนาที่เหมาะสม เขตปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อซีดส์คีย์จะได้รับผลกระทบจากเขตปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น p^- กับชั้นเอพิตาซี ทำให้แรงดันพังทลายสูงขึ้นตามหลักการของโครงสร้างรีเซฟ



รูปที่ 2. โครงสร้างซีดส์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติชนิดใหม่ (a) รูป มิติ b) รูปมองจากด้านบน (c) รูปหน้าตัดตามแนวเส้น AB

และเนื่องจากโครงสร้างของซีดส์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ ประกอบด้วยซีดส์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริฟต์ เรียงสลับกับซีดส์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์ ทำให้เขตปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อซีดส์คีย์ได้รับผลกระทบจากเขตปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น p^- ของซีดส์คีย์ไดโอด

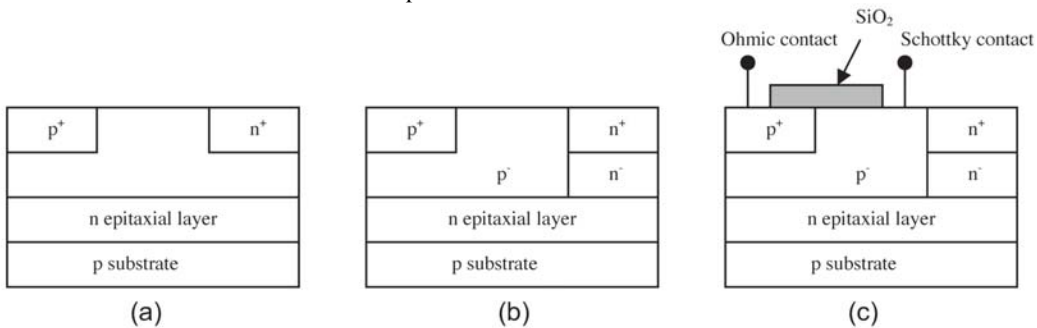
ชนิดพี-คริฟต์ กับชั้น n^- ของซีดส์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์ ทำให้สนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวมากขึ้นและมีแรงดันพังทลายสูงขึ้นซึ่งจากผลการจำลองของ F. Udrea แสดงให้เห็นว่าแนวคิดนี้มีประสิทธิผลจริง (Udrea et al., 1998)

การจำลองกระบวนการสร้าง

สิ่งที่สำคัญสำหรับ โครงสร้างแบบรีเซฟ คือ ความหนาของชั้นรีเซฟและความหนาแน่นของสารเจือในชั้นรีเซฟ ซึ่งต้องได้รับการควบคุมอย่างแม่นยำให้ผลคูณของทั้งสองมีค่าประมาณ 10^{12} cm^{-2} ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการสร้างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อให้ได้โครงสร้างซ็อดต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติตามต้องการ เราจึงได้ทำการจำลองกระบวนการสร้างด้วย TSUPREM4 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะ

เงื่อนไขของกระบวนการสร้างที่ใช้ในการจำลองมีดังต่อไปนี้คือ ใช้กระบวนการฝังไอออนด้วยฟอสฟอรัสที่โดส $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ด้วยพลังงาน 50 keV สำหรับชั้น n^+ ซึ่งทำหน้าที่เป็นรอยต่อโอห์มมิกสำหรับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์ และด้วยโบรอนที่โดส $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 50 keV สำหรับชั้น p^+ ซึ่ง

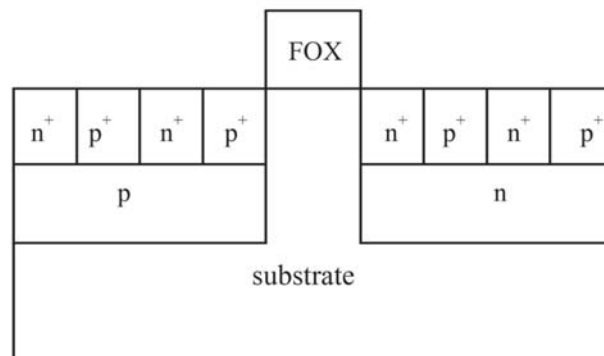
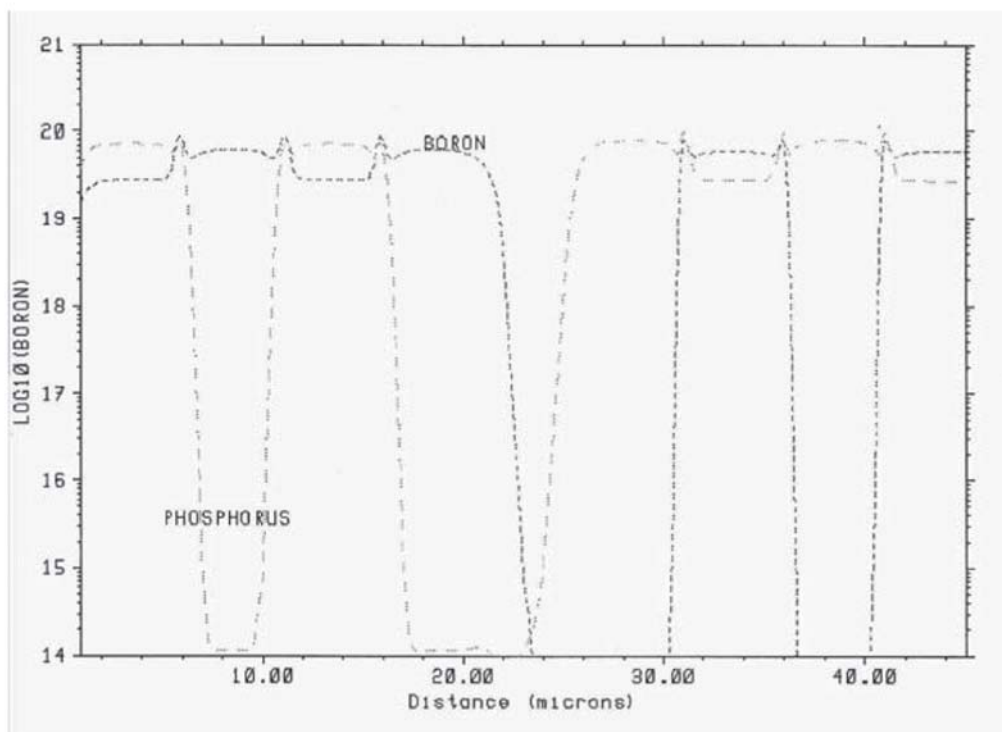
ทำหน้าที่เป็นรอยต่อโอห์มมิกสำหรับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริฟต์หลังจากนั้นทำการแอลนิตที่อุณหภูมิ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วตามด้วยกระบวนการไคร์ฟอนที่อุณหภูมิ $950 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างชั้นสารสำหรับรอยต่อซ็อดต์คีย์ซึ่งใช้กระบวนการฝังไอออนด้วยโบรอนสำหรับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิด พี-คริฟต์ และด้วยฟอสฟอรัสสำหรับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์ที่โดส $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ด้วยพลังงาน 80 keV หลังจากนั้นทำการแอลนิตที่อุณหภูมิ $650 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาทีแล้วตามด้วยกระบวนการไคร์ฟอนที่อุณหภูมิ $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงทำการสร้างชั้นฟิลด์ออกไซด์ (field oxide) หนา 1 ไมครอน และท้ายสุดเป็นการสร้างชั้นโลหะหนา 1 ไมครอนซึ่งเป็นอลูมิเนียมผสมกับซิลิคอน 1% เพื่อป้องกันการเกิดสปิกิง (spiking) รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างโดยคร่าวโดยเป็นรูปหน้าตัดตามแนวเส้น AB ในรูป (2) b



รูปที่ 3. ขั้นตอนกระบวนการสร้างโดยคร่าว (a) การสร้างชั้นรอยต่อโอห์มมิก (b) การสร้างชั้นรอยต่อซ็อดต์คีย์ (c) การสร้างชั้นฟิลด์ออกไซด์

เนื่องจากโครงสร้างซ็อดต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติ มีการเรียงสลับกันระหว่างซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริฟต์กับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์ ดังนั้นจึงได้ทำการจำลอง เพื่อดูการกระจายตัวของสารเจือในโครงสร้างที่มีการเรียงสลับของชั้น p^+ และชั้น n^+ บนชั้น p และชั้น n ดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วย ซึ่ง FOX ในรูปหมายถึงฟิลด์ออกไซด์ (field oxide) ทำหน้าที่เป็นเชฟฟะไลด์มาร์สค์ (self-aligned mask) สำหรับกระบวนการฝังไอออนและมีความกว้าง 5 ไมครอน โดยโครงสร้างที่ทำการจำลองนี้ ชั้น p^+ และชั้น n^+ มี

ความกว้าง 5 ไมครอน และใช้เงื่อนไขในการสร้างชั้น p^+ , n^+ , p , n เช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ผลของการจำลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่กำหนดให้ความกว้างของแต่ละชั้นเท่ากับ 5 ไมครอน โครงสร้างเรียงสลับของชั้น p^+ และชั้น n^+ จะปรากฏอย่างชัดเจน โดยที่ความหนาแน่นของสารเจือสูงสุดของทั้งชั้น p^+ และชั้น n^+ มีค่าประมาณ $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเพียงพอสำหรับการเกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิกสำหรับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริฟต์กับซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริฟต์

รูปที่ 4. โครงสร้างที่มีการเรียงสลับของชั้น p^+ และชั้น n^+ สำหรับการจำลองรูปที่ 5. ผลของการจำลองกระบวนการสร้างโครงสร้างในรูปที่ 4 เมื่อความกว้างของชั้น p^+ และชั้น n^+ เท่ากับ 5 ไมครอน

การออกแบบกระจกต้นแบบ

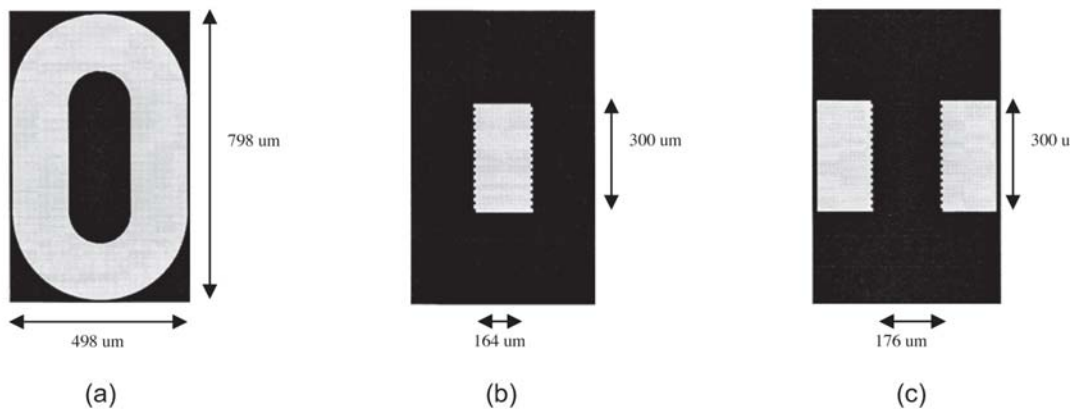
ในการนำโครงสร้างซ็อดต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติมาใช้งานจริงนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ลักษณะการเรียงสลับกันของบริเวณดริฟต์ (drift region) ในซ็อดต์คีย์ไดโอดชนิดพี-ดริฟต์กับชนิดเอ็น-ดริฟต์จะต้องเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยบริเวณดริฟต์ ในที่นี้

ก็คือชั้นสารสำหรับรอยต่อซ็อดต์คีย์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นรีเซฟ ดังนั้นการออกแบบกระจกต้นแบบที่เหมาะสม จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการสร้างซ็อดต์คีย์ไดโอดแบบรีเซฟ 3 มิติให้มีความแรงดันพังทลายสูงตามทฤษฎี ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ เราได้นำเสนอลักษณะการเรียงสลับของบริเวณ

คริปต์ในซอตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริปต์กับชนิดเอ็น-คริปต์ โดยใช้โครงสร้างแบบลู่วิ่ง (racetrack structure) ดังแสดงในรูปที่ 6 (a) โดยข้อดีของโครงสร้างแบบลู่วิ่งคือ ทำให้การเรียงสลับของชั้นรีเซพชนิดพีและชั้นรีเซพชนิดเอ็นดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะโค้งมนตรงบริเวณปลายของลู่วิ่งจะช่วยป้องกันการพังทลายก่อนเวลาอันสมควร (premature breakdown) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้หากเราใช้โครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมที่มีมุมแหลม ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเข้มสูงสุดของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณมุมแหลม จะสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ของโครงสร้างมาก

จากผลของการจำลองกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 4 เราได้ทำการออกแบบกระจกต้นแบบทั้งหมด

6 แผ่น โดยกระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 ตามรูปที่ 6 (b) ถูกออกแบบเพื่อสร้างชั้น n^+ ซึ่งทำหน้าที่เป็นรอยต่อโอห์มมิกสำหรับซอตต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ และรูปที่ 6 (c) แสดงถึงกระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 ซึ่งถูกออกแบบสำหรับสร้างชั้น p^+ ซึ่งทำหน้าที่เป็นรอยต่อโอห์มมิกสำหรับซอตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริปต์ สาเหตุที่ชั้นสารสำหรับรอยต่อโอห์มมิกไม่มีส่วนที่โค้งมนเป็นลักษณะลู่วิ่ง เป็นเพราะชั้นสารสำหรับรอยต่อโอห์มมิกนี้ไม่ใช่ส่วนสำคัญที่เป็นตัวกำหนดการพังทลาย ดังนั้นจึงถูกออกแบบมาให้มีเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นตรงของลู่วิ่งเพื่อให้สะดวกในการวัดกระแสแรงดันหลังจากที่สร้างเสร็จแล้ว



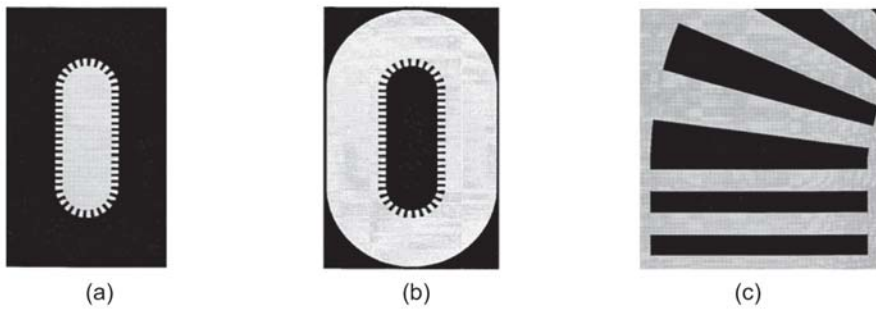
รูปที่ 6. (a) โครงสร้างแบบลู่วิ่ง (racetrack structure) (b) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 สำหรับรอยต่อโอห์มมิกในซอตต์คีย์ไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ (c) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 สำหรับรอยต่อโอห์มมิกในซอตต์คีย์ไดโอดชนิดพี-คริปต์

รูปที่ 7 (a) แสดงถึงกระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 สำหรับสร้างบริเวณคริปต์ ซึ่งก็คือชั้นสารสำหรับรอยต่อซอตต์คีย์ในไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ และเนื่องจากการเรียงสลับกันของชั้นรีเซพเป็นส่วนสำคัญที่เป็นตัวกำหนดการพังทลาย ดังนั้นจึงต้องเรียงสลับกันตลอดทั้งลู่วิ่ง ส่วนรูปที่ 7 (b) แสดงถึงกระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 สำหรับสร้างชั้นสารสำหรับรอยต่อซอตต์คีย์ในไดโอดชนิดพี-คริปต์ โดยมีรูปแบบการเรียงสลับเช่นเดียวกับกระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 แต่ตำแหน่งจะตรงกันข้ามกันพอดี สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับกระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 และ 4 นี้คือ ความแตกต่างระหว่าง

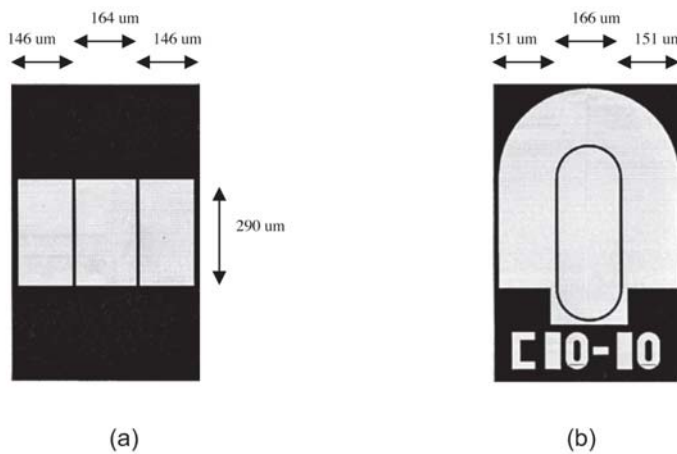
ความกว้างด้านในและด้านนอกของแต่ละแถบตรงบริเวณส่วนโค้ง ซึ่งจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามความรัศมีของส่วนโค้งที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 (c) ซึ่งหมายความว่าปริมาณของพาหะบริเวณด้านนอกจะมากกว่าด้านในและความแตกต่างนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามรัศมีเช่นเดียวกัน ซึ่งความแตกต่างนี้อยู่เหนือหลักการของโครงสร้างเรซ 3 มิติตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3 ซึ่งทำให้เป็นไปได้ว่าอาจเกิดการพังทลายก่อนเวลาอันสมควร ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องผลกระทบของขนาดของรัศมีที่มีต่อแรงดันพังทลายต่อไปในอนาคต

รูปที่ 8 (a) แสดงถึงกระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 สำหรับการเปิดช่องสัมผัสกับชั้นโลหะ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยช่องสัมผัสตรงกลางมีไว้สำหรับรอยต่อโอห์มมิกในไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ และรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิดพี-คริปต์ ส่วนช่องสัมผัสที่อยู่ด้านข้างทั้งสองมีไว้สำหรับรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ และรอยต่อโอห์มมิกในไดโอดชนิดพี-คริปต์ รูปที่ 8 (b) แสดงถึงกระจกต้นแบบแผ่นที่ 6 สำหรับการสร้างชั้นโลหะซึ่งมีทั้งหมด 2 ส่วนด้วยกัน คือ ชั้นโลหะส่วนที่อยู่ด้านในตรงกลางของโครงสร้างจะทำหน้าที่เป็นขั้วสำหรับรอยต่อโอห์มมิกในไดโอดชนิด เอ็น-คริปต์ และรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิด

พี-คริปต์ ในขณะที่ชั้นโลหะส่วนที่สองซึ่งอยู่ด้านนอกสุดที่เป็นรูปเกือกม้าคว่ำ จะทำหน้าที่เป็นขั้วสำหรับรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ และรอยต่อโอห์มมิกในไดโอดชนิดพี-คริปต์ โดยจะเชื่อมรอยต่อทั้งสองฝั่งเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อให้การป้อนแรงดันไบแอสให้กับซอสและเดรนของทั้ง 2 ฝั่งเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ ชั้นโลหะนี้ยังได้ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นฟิลด์เพลต (field plate) ซึ่งจะช่วยเพิ่มแรงดันพังทลายได้ (Baliga, 2005) ส่วนตัวอักษร "C" เลขสิบ 2 ตัวที่อยู่บริเวณด้านล่างของกระจกต้นแบบแผ่นที่ 6 มีไว้สำหรับการอ้างอิงในการวิจัยนี้



รูปที่ 7. (a) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 สำหรับรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิดเอ็น-คริปต์ (b) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 สำหรับรอยต่อข้อต่อค้ำยันในไดโอดชนิดพี-คริปต์ (c) ภาพขยายลักษณะตรงส่วนมุม



รูปที่ 8. (a) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 สำหรับการเปิดช่องสัมผัสกับชั้นโลหะ (b) กระจกต้นแบบแผ่นที่ 6 สำหรับสร้างชั้นโลหะ

สรุป

โครงสร้างซ็อกเก็ตซีไอโอเดแบบรีเซฟ 3 มิติ ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรก โดยอาศัยผลการจำลอง ของโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติของ F. Udrea มาช่วยรองรับ แนวคิดที่ว่าโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติมีประสิทธิภาพในการเพิ่มแรงดันพังทลายให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างรีเซฟ 2 มิติ โดยโครงสร้างรีเซฟ 3 มิติที่ นำเสนอในบทความนี้ใช้การแยกโหนดด้วยรอยต่อ (junction isolation) และได้มีการออกแบบโครงสร้าง ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างของซ็อกเก็ตซี ไอโอเดนั้น ยังไม่ปรากฏการนำเสนอแนวคิดที่เป็น โครงสร้างแบบรีเซฟ 3 มิติมาก่อน นอกจากนี้เราได้ ทำการจำลองกระบวนการสร้าง และประสบความสำเร็จ ในการหาเงื่อนไขของกระบวนการสร้าง ที่เหมาะสม นอกจากนี้เราได้ทำการจำลองโครงสร้าง เรียงสลับของชั้น p^+ และชั้น n^+ ซึ่งผลของการจำลอง แสดงให้เห็นว่า สำหรับกระบวนการสร้างที่ออกแบบ ไว้นี้ มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการสร้างอุปกรณ์ จริงต่อไปในอนาคต และเมื่อความกว้างของชั้น p^+ และ ชั้น n^+ มีค่า 5 ไมครอน จะทำให้ปรากฏเป็นชั้น p^+ และชั้น n^+ ที่ชัดเจน และความหนาแน่นของสาร เจือสูงสุดของทั้งชั้น p^+ และชั้น n^+ มีค่าประมาณ $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเพียงพอ สำหรับการเกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิก อีกทั้งเราได้นำเสนอกระจกต้นแบบที่จำเป็นในการ สร้างโครงสร้างซ็อกเก็ตซีไอโอเดแบบรีเซฟ 3 มิติ นี้ ตามกระบวนการสร้างที่ได้จำลองไว้ ซึ่งมีกระจก ต้นแบบทั้งหมด 6 แผ่น โดยได้มีการออกแบบ ให้มีลักษณะเป็นลู่วิ่ง และชั้นโลหะได้ถูกออกแบบให้ ทำหน้าที่เป็นฟิลด์เพลต (field plate) ซึ่งจะช่วยเพิ่ม แรงดันพังทลายได้ สำหรับขั้นต่อไปเพื่อให้งานวิจัยนี้ สมบูรณ์ยิ่งขึ้นนั้น ควรมีการจำลองโครงสร้างด้วย ซอฟต์แวร์เฉพาะทาง หรือสร้างโครงสร้างนี้ขึ้นมา เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- พิรศักดิ์ จันทร์งาม. 2551. โครงสร้างและ การออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับ ดับเบิ้ลเกตดีมอสเฟต แบบรีเซฟ 3 มิติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 31 (3): 617-629.
- พิรศักดิ์ จันทร์งาม 2551. โครงสร้างและ การออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับ พี-เอ็นไอโอเดแบบรีเซฟ 3 มิติ. วารสาร วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 18 (3): อยู่ระหว่างดำเนินการตีพิมพ์.
- Florin Udrea. 2002. **Advanced 3D RESURF Devices for Power Integrated Circuits.** Proceeding of CAS: 229-238.
- Appels J. A. and Vaes H. M. J. 1979. High Thin Layer Devices (RESURF Devices). **IEDM Tech. Dig.:** 238-241.
- Adriaan W. Ludikhuizen. 2000. **A Review of RESURF Technology.** Proceeding of ISPSD.: 11-18.
- V. Khemka, V. Parthasarathy, R. Zhu, and A. Bose. 2003. A Floating RESURF (FRESURF) LD-MOSFET Device Concept. **IEEE Electron Device Letters.** 24 (10): 664-666.
- J. Xie and Y. Han. 2001. **A Novel RESURF LDMOS With Embedded CB-Layer.** Proceedings of International Conference on Solid-State and Intevgrated-Circuit Technology(ICSICT). 1: 174-177.
- M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto. 2007. 4H-SiC Lateral Double RESURF MOSFETs with Low On-Resistance. **IEEE Transactions on Electron Devices.**

- 54 (5): 1216-1223.
- S. Karmalkar, J. Deng, M. S. Shur, and R. Gaska. 2001. RESURF AlGa_N/Ga_N HEMT for High Voltage Power Switching. **IEEE Electron Device Letters**. 22 (10): 373-375.
- F. Udrea, A. Popescu, and W. I. Milne. 1998. 3D RESURF Double-gate MOSFET: A Revolutionary Power Device Concept. **Electronics Letters**. 34(8): 808-811.
- G. P. V. Pathirana, F. Udrea, R. Ng, D. M. Garner, and G. A. Amaratunga. 2003. **3D-RESURF SOI LDMOSFET For RF Power Amplifiers**. Proceedings of International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD) : 278-281.
- Y. Taur and T. H. Ning. 1998. Fundamental of Modern VLSI Devices. Cambridge: Cambridge University Press.
- S. M. Sze. 1998. Modern Semiconductor Device Physics. New York: John Wiley & Sons. B. Jayant Baliga. 2005. Silicon Carbide PowerDevices. New Jersey: World Scientific.