

תקציר

אלקטרוניקה מבוססת-ספין, הידועה גם בשם **ספינטרוניקה**, הינה תחום מחקרי חדש המתפתח במהירות, בו רותמים את דרגת החופש הספינית של האלקטרון לפיתוח דור חדש של רכיבים אלקטרוניים. בהשוואה לרכיבים אלקטרוניים המבוססים רק על המטען החשמלי של האלקטרון, רכיבים אלו עדיפים מבחינת מהירות, צפיפות, חוסר נדיפות וצריכת חשמל.

פיתוח תא-זיכרון מהיר מגנטי, MRAM, הוא אחד היעדים החשובים בתחום. פיתוח זה זוקק את היכולת לשלוט בכיוון המגנטיזציה של שכבה ננומטרית. עד לאחרונה, שליטה זו בוצעה על ידי יצירת שדות מגנטיים באמצעות זרמים חשמליים. שליטה זו ישנם שני חסרונות בולטים המגבילים את היכולת להקטין ולדחוס את תאי הזיכרון: ראשית, לשדות המופעלים יש השפעה סביבתית רחבה, שנית, הקטנת ממדי תא הזיכרון לא מקטינה את השדה הנדרש להיפוך המגנטיזציה. מתוך חיפוש אחר שיטה יעילה קיים עיסוק נרחב באינטראקציה בין זרם מקוטב ספינית לבין מגנטיזציה, אשר יכולה ליצור דינמיקה במגנטיזציה של שכבה בהשפעת זרמים הזורמים בתוכה. דוגמאות בולטות לדינמיקה זו הן תנועה של קירות מגנטיים והיפוך מגנטי בהתקנים רב שכבתיים.

אינטראקציה זו, שיכולה להיות מנוסחת גם כמומנט זוויתי בין הזרם לבין המגנטיזציה או כחילופי מומנט זוויתי בין השניים, מתקיימת רק כאשר ישנה אי אחידות מרחבית של המגנטיזציה. באזור של קיר מגנטי או באזור הגבול בין שכבות שונות אי אחידות זו בולטת. כך שהציפייה הראשונית היא שלא תהיה השפעה לאינטראקציה זו רחוק מאזורי הגבול. אולם, מחקרים תיאורטיים צופים כי אפילו שינויים קטנטנים של המגנטיזציה כתוצאה מפלוקטואציות תרמיות יכולים לגרום להתפתחות של אי יציבות מגנטית מושרית זרם גם בשכבה אחידה. גודלו של זרם הסף היוצר אי יציבות מגנטית תלוי במערכת.

כמקור לזרם מקוטב ספינית נח להשתמש במתכות מגנטיות בהן לאלקטרונים ברמת ההולכה יש חוסר איזון טבעי באיכלוס של מצבי הספין. במחקר זה השתמשתי בשכבות דקות של SrRuO_3 . SrRuO_3 הינה תרכובת פרומגנטית בעלת איזוטרופיה מגנטית חד-צירית אשר ההולכה החשמלית בה מבוססת ברובה על אלקטרונים המאכלסים את רמות האנרגיה 4d של אטום הרוטניום. בהשוואה למתכות המעבר בהן ההולכה מבוססת על רמות האנרגיה 3d, כמו ברזל, הקיטוב הספיני במתכת זו גדול ומגיע ל-50%. למתכת זו יש קירות מגנטיים דקים מאוד, כ-3 ננומטר, המסודרים בצורה של פסים וכבר נצפתה בה תנועה של קירות מגנטיים בהשפעת זרם ביעילות גבוהה מאוד.

בחלקה הראשי של עבודה זו חקרנו השראת היפוכים מגנטיים בשכבה אחידה מגנטית של SrRuO_3 באמצעות הזרמת זרמים חשמליים בתוך השכבה. הראנו כי לזרם יש השפעה על ההיפוך החורגת מחימום הדגם ומהשדה המגנטי הנוצר על יד הזרם. אפיינו את התלות של זרם הסף בטמפרטורה ובשדה מגנטי חיצוני. גילינו כי בטמפרטורות נמוכות ההיפוך המגנטי המושרה על ידי

הזרם היה כמעט ללא תלות בשדה החיצוני וכי הזרם יוצר היפוכים גם כאשר השדה החיצוני מתנגד להיפוך. עבודה זו פורסמה תחת הכותרת: "Current-induced magnetization reversal in SrRuO₃", [Y. Shperber](#), D. Bedau, J. W. Reiner, and L. Klein, Phys. Rev. B **86**, 085102 (2012).

כאשר בחנו את השפעתם של זרמים הקטנים מעט מזרם הסף, ראינו כי קיים תחום בו היפוכים מושרי זרם מתרחשים בסיוע של פלוקטואציות תרמיות. גילינו כי עבור טמפרטורה קבועה הזמן הממוצע להיפוך תלוי אקספוננציאלית בזרם ועבור זרם קבוע הוא תלוי אקספוננציאלית בטמפרטורה ההופכית. ניתן לתאר את הזמן הממוצע להיפוך על ידי משוואת Néel Brown כאשר אנרגיית המחסום תלויה בטמפרטורה ומוקטנת לינארית על ידי הזרם. עבודה זו פורסמה תחת הכותרת: "Thermally assisted current-induced magnetization reversal in SrRuO₃", [Y. Shperber](#), O. Sinwani, N. Naftalis, D. Bedau, J. W. Reiner, and L. Klein, Phys. Rev. B **87**, 115118 (2013).

לקשר ההדדי בין הספין של אלקטרוני ההולכה לבין המגנטיזציה יש ביטוי משמעותי מאוד בתלות של ההתנגדות החשמלית במגנטיזציה. לתלות זו חשיבות רבה בפיתוח התקנים חדשים מבוססי ספינטרוניקה, והיא מהווה הבסיס לחלק ניכר מרכיבי הזיכרון והחיישנים הקיימים היום. בעבודה זו התמקדנו בתופעות הידועות כ (AMR) Anisotropic Magnetoresistance ו Planar Hall effect (PHE).

AMR היא תופעה הנגרמת על ידי צימוד ספין-מסילה, בה הפיזור של נושאי המטען בשכבה נושאת זרם תלוי בכיוון הזרם ביחס למגנטיזציה. לפיזור זה יש גם מרכיב רוחבי המכונה PHE. בשכבה ללא סידור גבישי, בה זרם חשמלי בכיוון x והמגנטיזציה נמצאת בתוך משור x-y, לשדה החשמלי הנוצר כתוצאה מ AMR ו PHE יש מרכיב אורכי $E_x = \rho_{\perp} J_x + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi J_x$, ובנוסף מרכיב רוחבי $E_y = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) J_x \sin \varphi \cos \varphi$, כאשר φ היא הזווית בין הזרם לבין המגנטיזציה.

התנגדות חשמלית לא איזוטרופית יכולה להיווצר גם ללא מגנטיזציה כתוצאה ממבנה לא קובייתי של הגביש. המשוואות המתארות את השדה החשמלי במקרה זה זהות למשוואות שרשמנו לעיל כאשר φ מייצגת את הזווית בין הזרם לבין אחד מצירי הגביש. הביטויים המתארים את השדות החשמליים בשכבה שיש בה גם סידור גבישי וגם מגנטיזציה יכולים להיות מורכבים יותר ולהכיל תלות גם בזווית שבין הזרם לבין המגנטיזציה וגם בזווית שבין הזרם לבין אחד מצירי הגביש.

בחלק זה של העבודה גילינו שינויים באנאיזוטרופיה החשמלית בשכבות של SrRuO₃ כתוצאה מהשראת מגנטיזציה בפאזה הפאראמגנטית על ידי מדידות של PHE. מצאנו כי שינויים אלו פרופורציוניים ל M^2 ותלויים בכיוון המגנטיזציה. נתנו תיאור מלא להתנהגות זו ב 160 K עבור מגנטיזציה במישור (001). עבודה זו פורסמה תחת הכותרת: "Field induced resistivity

anisotropy in SrRuO_3 films", [Y. Shperber](#), I. Genish, J. W. Reiner, and L. Klein, J. Appl. Phys. **105**, 07B106 (2009).

עבודה זו הורחבה אל עבר הפאזה הפרומגנטית ועבור זוויות שונות של זרם ביחס לגביש. ראינו כי ה-AMR וה-PHE מתוארים יפה על ידי צירוף של המקורות המגנטיים והגבישיים שלהם ללא צורך באיברים המתארים השפעה מורכבת יותר. עבודה זו פורסמה תחת הכותרת: "Low-temperature anisotropic magnetoresistance and planar Hall effect in SrRuO_3 ", N. Haham, [Y. Shperber](#), J. W. Reiner, and L. Klein, Phys. Rev. B **87**, 144407 (2013).

לסיכום, תיזה זו עוסקת בתופעות הנובעות מקשרי הגומלין שבין זרם מקוטב ספינית לבין המגנטיזציה של השכבה משני היבטים החשובים לפיתוח רכיבי ספינטרוניקה חדשניים. היא כוללת, מחד, את ההבחנה כי זרם מקטין את מחסום האנרגיה להיפוך וכאשר הוא גדול מזרם סף הוא מעורר אי יציבות מגנטית בשכבה אחידה מגנטית של SrRuO_3 ; ומאידך את התלות של ההתנגדות הלא איזוטרופית במגנטיזציה בפאזה הפאראמגנטית והפרומגנטית.