1.2 מחקר CLIC

המחקר המתואר בתזה זו נעשה בשיתוף פעולה עם מחקר CLIC שהוזכר לעיל [4]. לכן, להלן תיאור קצר של מחקר CLIC.

CLIC הוא שיתוף פעולה בינלאומי שעובד על קונספט מאיץ חלקיקי אוזן (linac) מהדור הבא, להתנגשות באלקטרונים ופוזיטרונים באנרגיות של עד 3 TeV. בשלב הראשוני, בו אורך הלינאק יהיה 11.4 ק"מ (ראה איור 1.1), אנרגיית ההתנגשות תגיע ל-380 GeV. ה-linac יורכב מסדרה של מבנים בעלי מוליכות גבוהה ללא חמצן (OFHC) Cu מאיצים, שכל אחד מהם באורך של כ-25 ס"מ, ראה איור 1.2. כאשר אלומת החלקיקים העיקרית שיתנגשו עוברת דרך כל מבנה מאיץ, מופעל בתוך המבנה שדה חשמלי בתדר רדיו פועם (rf) של עד 100 MV/m, ובכך מאיץ את האלומה. זֶה

1.2 מחקר CLIC 5

איור 1.1: מפת השלבים המוצעים של CLIC, שייבנו מתחת לאדמה. איור 1.2: מבנה מאיץ CLIC.

שדה חשמלי נקרא גם שיפוע תאוצה. אורכו של כל פולס הוא כ-200 ns, והפולסים מופעלים בקצב חזרות של 50 הרץ. כפי שתואר קודם לכן, מחקר CLIC נתקל בפירוק ואקום, בין האלקטרודות של המבנים המאיצים, כגורם העיקרי המגביל את שיפוע האצה שניתן להשיג. אם מתרחשת התמוטטות במהלך פעולת המאיץ, אלומות החלקיקים המואצות לא יתנגשו [5]. לפיכך, המטרה ב-CLIC היא להפחית את שיעורי התמוטטות ל-3 × 10-7 התמוטטויות לפולס למטר (bpp/m) של אורך המאיץ [6]. כדי לחקור תקלות בסביבה פשוטה יותר, ומיועדת יותר למחקר שלהן, נקבעו הגדרות זרם ישר (dc).

6 מבוא

איור 1.3: אלקטרודה של ה-LES.

נבנה ב-CERN ובמקומות אחרים. אחת מהן היא מערכת האלקטרודות הגדולות (LES) ב-CERN, ראה איור 1 בפרק 4 ואיור 1.3 כאן. בעוד שכמה מאפיינים של הגדרות ה-rf וה-dc שונים כמובן, תובנות רבות שהושגו ממדידות dc הוכחו כתקפות גם במערכות rf [5

1.3 נקעים

השלבים המובילים להתמוטטות הוואקום מורכבים משינוי פני השטח על ידי השדות האלקטרומגנטיים, המוביל לפליטת אלקטרונים והתאדות של חומר האלקטרודה בוואקום, ולאחר מכן, לקשתות, כמתואר בפירוט בפרק 3. התהליך עם זאת, המוביל לשינוי פני השטח הראשוני, אינו מובן היטב. כאשר בוצעו ניסויים בחומרי אלקטרודה שונים, נמצא מתאם בין שיעורי פירוק נמדדים למבנה הגבישי של החומרים שנבדקו, כלומר, אם החומר היה מעוקב מרוכז בפנים (fcc), מרוכז בגוף (bcc), או משושה. חומר מבנה צפוף (hcp). בנוסף, שיעורי התמוטטות השתנו בין אלקטרודות בעיבוד שונה, גם כשהן היו עשויות מאותו חומר. זה הצביע על הניידות של נקעים

1.3 נקעים 7

מעורב איכשהו בגרעין התמוטטות [9]. מכיוון שרעיון זה, אם כי בצורה שונה, פותח בתזה זו, להלן תיאור קצר של מבני גביש ונקעים.

אטומים בגביש מאורגנים במבנים מחזוריים, המוגדרים על ידי וקטורי תרגום ~a1, ~a2 ו~a3, שאינם בהכרח אורתוגונליים. הגביש נראה אותו הדבר במבט מהנקודה ~r או מהנקודה ~r0 = ~r + u1 ~a1 + u2 ~a2 + u3 ~a3, עבור כל מספר שלם u1, u2 ו-u3. קבוצת הנקודות ~r0 נקראת סריג. בסיס, המורכב מאטום אחד או יותר, מחובר לכל נקודה של הסריג [10].

אטומי המתכות מסודרים בדרך כלל כסריג מעוקב במרכז גוף (bcc), מרוכז מעוקב (fcc) או סריג משושה (hcp). כפי שהשם שלו מרמז, וקטורי התרגום של סריג ה-bcc הם באורך שווה ואורתוגונליים. a = |~a1| = |~a2| = |~a3| נקרא קבוע הסריג. הבסיס, הכלול בכל תא של סריג bcc, מורכב משני אטומים, בנקודות (0, 0, 0) ו- (a2,a2,a2) של כל תא, ראה איור 1.4(א). וקטורי התרגום של סריג fcc זהים לאלו של סריג bcc. הבסיס שלו, לעומת זאת, מורכב מארבעה אטומים, במיקומים (0, 0, 0), (a2,a2,0), (0,a2,a2) ו-(a2,0,a2), כפי שמוצג. באיור 1.4(ב) [10].

בסריג hcp, |~a1| = |~a2|, ויש ביניהם זווית של 120◦. ~a3 מאונך לשני הוקטורים האחרים, ואורכו הוא בסביבות p8/3 פעמים שלהם, ראה איור 1.4(c) [10].

ניתן למצוא כמה סוגים של פגמים במבנה הגבישי של מתכות. נקעים הם סוג אחד כזה, שבו חלק אחד של גביש נעקר, או מחליק, ביחס לחלק אחר. הנקע הוא הגבול בין אזורים החלקים ובלתי החלקים בגביש. אם קו העקירה מאונך לכיוון ההחלקה, הנקע הוא נקע בקצה, ראה איור 1.5(א). אם הוא מקביל לו, מדובר בנקע של בורג, ראה איור 1.5(ב) [10].

8 הקדמה איור 1.4: (א) bcc, (b) fcc, ו-(ג) סריג hcp.

איור 1.5: (א) קצה ו(ב) נקעים של בורג.

1.3 נקעים 9

איור 1.6: מעגל הבורגרים ב(א) הגביש עם הנקע ו(ב) גביש מושלם. וקטור הבורגרים סוגר את המעגל ב-(ב).

ניתן לאפיין את כיוון ההחלקה על ידי וקטור Burgers ~b. כדי למצוא את הווקטור של בורגרס, מציירים מעגל סגור עם כיוון השעון סביב קו הנקע בגביש, כמו באיור 1.6(א). ואז מציירים מעגל עם כיוון השעון עם אותם קישורים מאטום לאטום בגביש מושלם, כמו באיור 1.6(ב). הווקטור הנדרש לסגירת המעגל בגביש המושלם הוא וקטור הבורגרים ~b. אם ˆξ הוא הכיוון של קו הנקע, אז ~b ·ˆξ = 0 עבור פריקת קצה, ו~b ·ˆξ = ±b עבור פריקת בורג (הפלוס או המינוס תלוי בבחירה שרירותית של תחושת הנקע קַו). באופן כללי, ניתוק יכול להיות בעל תו מעורב, עם רכיבי קצה ובורג, וניתן לפתור את וקטור הבורגרים שלו לרכיב בורג ~bs = (~b ·ˆξ)ˆξ ורכיב קצה ~be = ˆξ × (~ b × ˆξ) [11].

לחץ חיצוני מפעיל כוח על נקע שעלול לגרום לו לנוע. המרכיבים הווקטוריים של הכוח, ליחידת אורך של נקע, הם

Fk = − ijkξiσjlbl, (1.1)

10 מבוא

כאשר ijk הוא אופרטור התמורה, ו-σ הוא טנסור המתח החיצוני. עם זאת, נקעים אינם נעים בחופשיות דרך הגביש המכיל אותם. במקום זאת, הם נעשים מוצמדים, או יושבים, כאשר הם מצטלבים עם נקעים אחרים. נקעים מוצמדים יכולים להוביל ליצירת נקעים חדשים, או יכולים להמשיך בתנועתם, כתוצאה מתהליכים מופעלים תרמית. דוגמה לסוג הראשון של תהליך הוא מנגנון Frank-Read (נדון עוד בסעיף 1.7), ודוגמה לסוג השני היא החלקה צולבת. כל אחד מהסוגים מוביל ליצירת נקעים ניידים, אשר לאחר מכן ניתן להכחיד או כאשר הם הופכים לישיבים, או כאשר הם מגיעים לפני השטח של המתכת וגורמים לעיוות שלה [11].