*קיבול והתנגדות בדיודה- סכמת תמורה לאות קטן*

*קיבול הוא תופעה פיזיקלית שבה מטען משתנה כפונקציה של המתח. קיבול של 1 פראד מוגדר כשינוי של 1 קולון על פני 1 וולט. בדרך כלל אנו נפגוש בטבע ובהתקנים אלקטרונים קיבולים מסדרי גודל קטנים בהרבה, של מיקרו ו-ננו פראד. נוסחת הקיבול היא:   
התנגדות חשמלית זאת התכונה של חומר המתארת את הקשר בין המתח שמופעל על גוף והזרם שנוצר בו.* אוהם 1 מוגדר בתור ההתנגדות בין שני קצוות של מוליך מתכתי שהפעלת מתח של וולט אחד ביניהם מייצרת מעבר זרם של אמפר אחד, כלומר וולט חלקי אמפר*. נוסחת ההתנגדות לפי חוק אוהם היא:*

*כדי להסביר את תופעת הקיבול וההתנגדות בדיודה קודם נדבר טיפה על מטען חשמלי. יחידות המטען הבסיסיות נקראות אלקטרונים ופרוטונים. לאלקטרון ולפרוטון מטען זהה בגודלו אך מנוגד בסימנו והוא בקירוב קולון, כאשר לאלקטרון מיוחס מטען שלילי ולפרוטון מטען חיובי. בין מטענים חשמלים קיים כוח הנתון על ידי חוק קולון . כלומר מטענים בעלי סימן זהה דוחפים אחד את השני ומטענים בעלי סימן שונה מושכים אחד את השני. הכוח פרופורציוני ליניארי חיובי לשינוי במטען ודועך ריבועית כפונקציה של המרחק.*

*תכונה נוספת המאפיינת מטענים חשמליים היא שדה חשמלי. תכונה פיזיקלית זו מאפיינת את הסביבה המקיפה מטען חשמלי וקובעת מהו הכוח שיורגש ע"י מטען שיונח בנקודה כלשהי בסביבה של המטען. שדה זה נתון ע"י : כאשר Q זהו המטען היוצר את השדה, q זהו מטען הבוחן עליו מודדים את הכוח ו-r זהו המרחק בין המטענים. ניתן לראות כי שדה שיוצר מטען שלילי הוא בכיוון המטען ושדה שיוצר מטען חיובי הוא בכיוון הפוך מהמטען. היחס בין משקל הפרוטון למשקל האלקטרון הוא בקירוב 1833, כלומר יחס המשקלים בניהם דומה לזה של היפופוטם וארנבת . בשל כך ובשל סיבות אחרות (אדווין הול) אנו מתייחסים לפרוטונים כאל נייחים ולאלקטרונים כאל נושאי מטען ניידים. בתחום העיסוק של המוליכים למחצה נהוג להגדיר יצור דמיוני נושא מטען חיובי שעוזר בחישובים והוא נקרא חור. לחור מסה אפקטיבית זהה לזו של האלקטרון עבור נקודות מקבילות בפס האנרגיה אך מטענו חיובי. מסה אפקטיבית זוהי הגדרה מתמטית למסה של חלקיק כפונקציה של האנרגיה שלו .  
מהמכניקה הניוטונית אני למדים שכאשר פועל על גוף בעל מסה כוח מסוים הוא משנה את מהירותו. נתייחס כעת לאלקטרונים כאל כדורים בעלי מסה המצייתים לחוקי ניוטון. כאשר נפעיל על מוליך שדה חשמלי האלקטרונים והפרוטונים ירגישו כוח אולם רק האלקטרונים ינועו. לתנועה זו של מטענים קוראים זרם סחיפה. צפיפות הזרם נתונה ע"י . כאשר סיגמא היא המוליכות של החומר. זהו הראשון מבין שני הזרמים עליהם נדבר.*

*הזרם הנוסף בו נעסוק נקרא זרם דיפוזיה:*

דיפוזיה היא פיזור של חלקיקים בכיוון מפל הריכוזים שלהם *בדומה לתנועה של גופים בכיוון פוטנציאל גרביטציוני נמוך יותר. הגורמים נקראים ניידות ומקדם הדיפוזיה של חורים בהתאמה. ניתן לראות כי מקדם הדיפוזיה הוא פונקציה של הטמפרטורה, הניידות והמטען. זרם הדיפוזיה גדל כשהטמפרטורה או הניידות גדלים, והוא לא פונקציה של כוחות חיצוניים אלא מאופיין רק על ידי החומר.  
אם יש זרמים של מטען זה אומר שהוא יכול לזוז. האם תמיד כך המצב? נבדיל בין החומרים בטבע אשר מטענים יכולים לנוע בהם, אלו שמטענים לא יכולים לנוע בהם ואלו שזה תלוי.  
חומרים בטבע מתחלקים ל3 סוגים: מוליכים, מבודדים ומוליכים למחצה. לכל חומר בטבע יש אפיון ע"י דיאגרמת פסים. דיאגרמת פסים זהו השם לסכמה המתארת את רמות האנרגיה של המערכת בה אנו עוסקים (לא דווקא של חומר בודד). פסי האנרגיה הם רמות האנרגיה המותרות והאסורות עבור האלקטרון כפי שקיבלנו במסקנות של מודל קרונינג פני. רמות האנרגיה ורוחב הפסים הם בעצם אפיון של קונפיגורצית האלקטרונים באורביטלים של החומר. אורביטל זהו המבנה המרחבי שמתאר לנו משטח שווה הסתברות למציאת אלקטרון. כאשר אורביטל מסוים מכיל את המספר המקסימלי של האלקטרונים אותו הוא יכול להכיל נאמר שרמת האנרגיה מלאה. לעיתים בחומרים יש חפיפה בין פסי אנרגיה ולא תמיד מפריד בניהם פס אסור. עבור מוליכים למחצה פס האנרגיה שמעניין אותנו הוא הפס האסור הנמוך ביותר. הגבול התחתון של פס זה נקרא פס הערכיות, שם נמצאים כל האלקטרונים באורביטל החיצוני של החומר. הגבול העליון של הפס האסור נראה פס ההולכה, אליו אלקטרונים רוצים להגיע כדי שיוכלו להשתתף בהולכת מטען. אמצע הפס האסור נקרא רמת אנרגיה האינטרינזית והוא משמש אותנו לניתוח דיאגרמת הפסים ולחישובים שונים. נבדיל בין דיאגרמות פסים של פיסות סיליקון שונות לפי מיקום רמת פרמי ביחס לרמה האינטרינזית. רמת פרמי זוהי רמת אנרגיה תיאורטית אשר התפלגות פרמי-דיראק קובעת היכן היא תימצא ביחס לרמה האינטרינזית. התפלגות פרמי דיראק* זאת התפלגות הסתברותית שקובעת סיכויי אכלוס של רמת [אנרגיה](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94) מסוימת במערכת של פרמיונים זהים הנמצאת ב[שיווי משקל תרמודינמי](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A9%D7%99%D7%95%D7%95%D7%99_%D7%9E%D7%A9%D7%A7%D7%9C_%D7%AA%D7%A8%D7%9E%D7%95%D7%93%D7%99%D7%A0%D7%9E%D7%99).

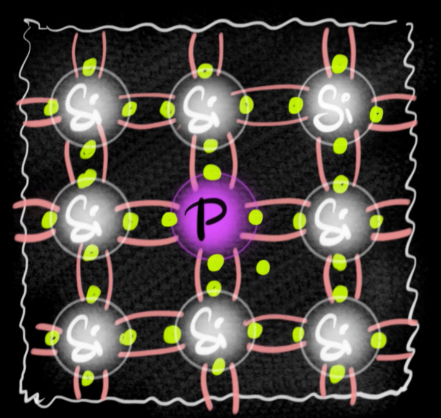
*החומרים המוליכים הם בעלי פס אנרגיה חצי מלא. המבודדים והמוליכים למחצה הם בעלי פס אנרגיה מלא כאשר ההבדל בניהם הוא שפס האנרגיה האסורה במבודדים הוא גדול, בעוד שבמוליכים למחצה הוא קטן. אנו משתמשים בתכונה זו של המוליכים למחצה כדי לייצר חומרים שמוליכים בתנאים הדרושים לנו ע"י אילוחים. אילוח זהו התהליך של זיהום המל"מ ע"י חומרים מהעמודה השלישית או החמישית בטבלה המחזורית. הסיבה לכך היא שחומרים אלה תורמים נושאי מטען חדשים, חורים או אלקטרונים, ומזיזים את רמת פרמי לכיוון פס הערכיות או ההולכה (בהתאם לאילוח) ובכך מייצרים תנאים נוחים להולכת מטען.*

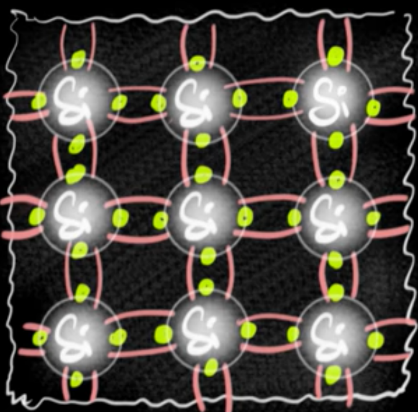
***סוגי אילוחים עבור סיליקון***

*נוכל לזהם את פיסות המל"מ באילוחים שונים ובכך לייצר תכונות הולכה הדומות לשל מוליכים. בהתאם לאילוח יתקבלו במל"מ נושאי מטען חיוביים ושליליים בכמויות שונות. נקרא לנושאי המטען בכמות הגדולה יותר נושאי הרוב ולאחרים נושאי המיעוט.*

*סיליקון מאולח בתורמים סיליקון מאולח במקבלים סיליקון לא מאולח*

*(1)*

*(תמונה שמכילה עוגה, יום הולדת, רכבת, ילד

התיאור נוצר באופן אוטומטי*

***n***-***type – תורמים-*** *אילוח מהעמודה ה-5 בטבלה המחזורית. אילוח זה מזיז את רמת פרמי קרוב יותר לפס ההולכה ובכך בעצם מייצר סיכויי אכלוס גדולים יותר בפס ההולכה. האטום התורם מאופיין ב5 אלקטרוני ערכיות ולאחר האילוח נשאר אלקטרון "חופשי" שיכול לנוע ביתר קלות. נושאי הרוב בפיסה זו הם האלקטרונים. מפני שהתורמים הגיעו עם מטען כולל ניטרלי ו****תרמו*** *אלקטרון לטובת ההולכה מטענם לאחר האילוח הוא חיובי.*

**p-type *– מקבלים-*** *אילוח מהעמודה ה-3 בטבלה המחזורית. אילוח זה מזיז את רמת פרמי קרוב יותר לפס הערכיות ובכך בעצם מייצר סיכויי אכלוס נמוכים יותר בפס הערכיות. האטום התורם מאופיין ב3 אלקטרוני ערכיות ולאחר האילוח נשאר מקום פנוי לעוד אלקטרון אחד, או כמו שנקרא לו מעכשיו-* ***חור****. נושאי הרוב בפיסה זו הם החורים. בדומה לתורמים, המקבלים* ***קיבלו*** *אלקטרון ומטענם לאחר האילוח הוא שלילי.*

*כדי למצוא מהו ריכוז נושאי המטען בפיסה מסוימת נשתמש במשוואות:*

*היא הצפיפות האינטרינזית של החלקיקים בחומר ללא כל אילוח והיא ידועה ושונה עבור חומרים שונים. N זהו מספר האטומים המאלחים, והסאב סקריפט a ו-d הם עבור המקבלים והתורמים בהתאמה.*

*תורמים- רמת פרמי קרובה לפס ההולכה מקבלים- רמת פרמי קרובה לפס הערכיות*

*תמונה שמכילה כדור, שחקן, מסך, אחזקה

התיאור נוצר באופן אוטומטיתמונה שמכילה צילום, כהה, שחקן, ישיבה

התיאור נוצר באופן אוטומטי*

*(2)*

*תמונה שמכילה צילום, מסך, צג, מחשב נישא

התיאור נוצר באופן אוטומטימה קורה כשמחברים אחד בצמוד לשני סיליקון מאולח בתורמים וסיליקון מאולח במקבלים?  
בסיליקון n-type נושאי הרוב הם אלקטרונים בעוד שב p-type נושאי הרוב הם חורים. אם חיברנו בין שתי פיסות סיליקון כאלו בהתאם לחוק קולון נצפה שמטענים אלו ימשכו אחד את השני. כלומר נראה תנועה של אלקטרונים מהצד ה-n לצד ה-p ותנועה של חורים מצד ה-p לצד ה-n. אך נזכור כי חור הוא אינו מטען אמיתי והוא בעצם הסימון שלנו להיעדר אלקטרון. אז מה קורה כאשר אלקטרון וחור נפגשים? האלקטרון הגיע ליון חיובי ובעצם השלים את פס הערכיות של האטום ככה שהאורביטל החיצוני התמלא. תהליך זה נקרא רקומבינציה. באזור בו התאחדו מספיק אלקטרונים וחורים מתחיל להיווצר מטען נייח. מטען זה מגיע בעצם מהאטומים המאלחים, שהמטען העודף (חורים או אלקטרונים) שהם הביאו איתם כשהיו נטרלים נעלם. כלומר בצד ה-n מצטבר מטען חיובי ובצד ה-p מצטבר מטען שלילי. (3)*

*המעבר של מטענים מתרחש באזור המגע בין הפיסות (באיור- בין הקווים המקוטעים). המטען החיובי בצד ה-N מתחיל לייצר שדה חשמלי בכיוון חיצוני למטען, דבר שמקשה על מעבר של חורים לצד ה-N. ובדומה המטען השלילי בצד ה-P מתחיל להתנגד למעבר של האלקטרונים מהצד ה-N. המעבר הזה של מטענים ניידים נעצר כאשר השדה החשמלי שנוצר בעקבות ההצטברות של המטענים הנייחים (באיור הוא בכיוון שמאל) גדול מספיק בשביל לעצור את זרם הדיפוזיה. האזור בו לא קיימים מטענים ניידים והצטבר מטען נייח נקרא אזור המחסור של צומת PN .  
לאחר הגעה לשיווי משקל קיבלנו גודל מסוים של אזור מחסור. מה יקרה אם נגרום להפרש פוטנציאלים מסוים בין שתי הפיסות? נניח שנחבר הדק מתח . קונפיגורציה זו נקראת צומת PN בממתח אחורי. מתח זה ישרה שדה חשמלי בכיוון השדה הפנימי באזור המחסור ובכך יגדיל את השדה הכולל. הגדלת השדה הפנימי תגדיל את אזור המחסור על ידי הפעלת כוח על נושאי המטען הניידים כאשר האלקטרונים נעים הפוך מכיוון השדה (ימינה באיור) וחורים נעים בכיוון השדה (שמאלה). אם נחבר נאלץ שדה בכיוון הפוך מהשדה הפנימי ובכך נקטין את השדה הכולל. באופן דומה למקרה הקודם כעת אזור המחסור יקטן.*

*כאשר נגדיל או נקטין את המתח נגרום להגדלת או הקטנת המטען ש-"נחשף" באזור המחסור, או במילים אחרות - המטען באזור המחסור הוא פונקציה של המתח המושרה על הצומת. כלומר בצומת PN מתרחשת תופעה קיבולית! נתאר כעת את השינוי של המטען כפונקציה של המתח. ניתן לצומת ה-PN שם חדש- דיודה, ונחקור את התנהגות הדיודה תחת הפעלת מתח שונה.*

*רוחב אזור המחסור בצד ה-n:*

*רוחב אזור המחסור הכולל:*

*זהו המתח המושרה:*

*המטען בצד n של אזור המחסור:*

*הגדרת הקיבול:*

*הוא המתח המובנה באזור המחסור:*

*נציב נתונים, נגזור את הביטוי למטען ונקבל:*

*קיבלנו כי הקיבול של אזור המחסור נראה בדיוק כמו קיבול של קבל לוחות. ההבדל בין שני הקיבולים הוא שקיבול של קבל לוחות נשאר זהה לכל מתח שמפעילים עליו אולם קיבול המחסור תלוי במתח שמפעילים על הדיודה.*

*ישנו סוג קיבול נוסף בדיודה והוא נקרא קיבול הדיפוזיה. נסביר באילו תנאים קיבול זה מתקבל. נתבונן בדיאגרמה של כיפוף הפסים של דיודה בממתחים שונים.*

*תמונה שמכילה טקסט, מפה

התיאור נוצר באופן אוטומטי  
(4)*

*כאשר נפעיל ממתח אחורי נגדיל את השדה בתוך הדיודה. כתוצאה מכך כיפוף הפסים יגדל (איור שמאלי). כיפוף פסים זהו תיאור של רמות האנרגיה שמתקבל בצומת PN וממחישה את הפרש הפוטנציאלים בין הפיסות ובאזור המגע. נתייחס לאלקטרונים בתור כדורים שרוצים לרדת במדרון (כי אלקטרונים נעים בכיוון מינימום אנרגיה) ואילו חורים בתור בועות אוויר שרוצות לעלות לחלק העליון של כלי הקיבול שלהם (נעים הפוך מאלקטרונים). נדון בתנועתם של האלקטרונים בדיודה וניתן להבין בהקבלה מלאה עבור החורים. כאשר נגדיל את כיפוף הפסים יהיה לאלקטרונים קל לעבור מצד ה-P לצד ה-N מפני שמפל המתחים יגדל. אולם הואיל ובפיסה היא p-type האלקטרונים מהווים את נושאי המיעוט ולכן הזרם שמתקבל הוא קטן. זרם זה נקרא זרם הזליגה של הדיודה. אם נקטין את כיפוף הפסים נגיע להפרש פוטנציאלים קטן מספיק כך שהאלקטרונים מהפיסה ה-N יתחילו לבצע מנהור ולעבור לפיסה ה-P . מנהור זוהי תופעה שמאפיינת גלים בה לפונקציית הגל יש הסתברות חיובית להתגבר על הפרש פוטנציאלים שגדול מהאנרגיה שלה, דבר שלא קורה עבור חלקיקים קלאסים. בשל היותם נושאי הרוב נקבל זרם גדול בהרבה מאשר בממתח הקודם.*

*הזרם בדיודה כפונקציה של המתח:*

*- היא מקדם שתלוי בחומר ובדרך כלל ערכו 1 או 2. זהו המתח התרמי.*

*ניתן לראות כי הזרם במתח שלילי מספיק גדול הוא רק זרם הרוויה האחורי שנובע מהדיפוזיה של נושאי המיעוט. גודל זה אינו תלוי במתח הפועל על הדיודה אבל הוא מאוד קטן ולכן לרוב נזניח אותו. במעגלים חשמליים נהוג להתייחס לדיודה הממתח קדמי כאל נתק. עבור מתח חיובי נקבל גרף אקספוננציאלי מפני שהגודל של גדול בהרבה מ-1 (נדרוש לעבוד בטווח מתחים שיקיים את הדרישה הזאת)*

*תמונה שמכילה טקסט, מפה

התיאור נוצר באופן אוטומטי (5)*

*ננסה לתאר את התנהגות הדיודה במעגל חשמלי בו מופעל אות סינוסי. נפעיל על הדיודה אות מתח סינוסי קטן שרוכב על אות DC מספיק גדול כך שהדיודה תישאר בממתח קדמי, ונוכל להתייחס אל הגרף של הפונקציה שלה כליניארי סביב נקודת העבודה. נקודת העבודה (Q באיור) היא הנקודה על הגרף המתאימה למתח ה- DC של גל הסינוס שמתקבל בדיודה. ניתן לראות שנקודת העבודה משתנה לפי ערך ה- DC של האות שמופעל עליה וקיים תחום בו הקירוב הליניארי לא מתאר באופן טוב את הסביבה שלו.*

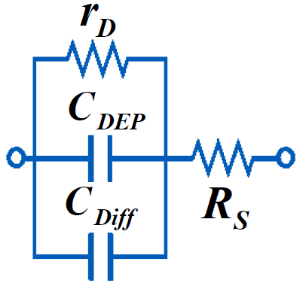
*ניתן להתיחס להתקן בו המתח והזרם מקיימים קשר ליניארי כאל נגד. במקרה זה המתח כפונקציה של הזרם מתקבל על ידי חוק אוהם: כאשר R היא ההתנגדות של ההתקן, I זהו הזרם הזורם בהתקן, ו-V זהו המתח המושרה עליו. נוכל להגדיר התנגדות כאל היחס בין השינוי במתח לבין השינוי בזרם או במילים אחרות:*

*נגזור את משוואת המתח של הדיודה ונקבל : . קיבלנו (באופן לא מפתיע) שההתנגדות של הדיודה תלויה בזרם הדיודה, שזה בתורו תלוי בנקודת העבודה.  
בממתח קדמי נוצר זרם סחיפה בעל צפיפות מטען*

*Lp זהו מרחק הדיפוזיה שמאפיין את הדעיכה של צפיפות נושאי המטען בפיסה הנגדית ממנה מגיע הזרם. זהו ריכוז החורים בתחילת פיסה ה-N . נתיחס למטען שהצטבר מזרם הסחיפה כאל דיפול, כמו הדיפול שנוצר באזור המחסור. אם כן כדי לקבל את המטען נסכום את צפיפות המטען:*

*נייצג את הקיבול כפונקציה של הזרם. נשתמש בקירוב של משוואת הזרם בדיודה בו נזניח את הגורם 1- (קירוב מוצדק מפני שהאקספוננט גדול מאוד ביחס אליו) ונקבל:*

*הפרמטר החדש נקרא זמן הדיפוזיה והוא מאפיין את הזמן שלוקח לחור לבצע התאחדות. אותן משוואות מתקבלות באופן מקביל עבור אלקטרונים בצד ה P והקיבול השקול הוא סכום שני הקיבולים (כי המטענים של נושאי המטען לא זהים, אז החיבור הוא לא טורי).*

*ראינו עד עכשיו כי בצומת ה-PN שבדיודה מתקבלת התנגדות דינאמית, קיבול מחסור וקיבול דיפוזיה ושלושתם תלויים בנקודת העבודה. נתאר כל מאפיין כזה של הדיודה באמצעות רכיב חשמלי מתאים, כלומר קבלים ונגד. אם נרצה לייצג את התנהגות הדיודה בסכמה של רכיבים אלקטרונים נחבר את שני הקבלים והנגד במקביל. שלושת הגדלים תלויים באותו מתח לכל מתח, ולכן חיבורם יעשה במקביל. בפועל ישנם שיקולים נוספים אותם נרצה לקחת בחשבון בהתאם לאופן העבודה שלנו עם הדיודה.   
בממתח אחורי אין הזרקה ולכן אין קיבול דיפוזיה. בממתח קדמי שני הקיבולים קיימים אך בדרך כלל קיבול המחסור זניח ביחס לקיבול הדיפוזיה. בדיודה אידיאלית יש להביא בחשבון גם נגד שיחובר בטור שנובע מההתנגדות של האזורים הניטרלים בדיודה (אלו שלא שייכים לאזור המחסור). החיבור יעשה בטור מפני שהזרם דרך אזורים אלה שווה לסכום הזרמים שעוברים בנגד הדינאמי ושני הקבלים.*

*לבסוף סכימת התמורה הכללית ביותר עבור דיודה סביב נקודת עבודה באזור ליניארי נראית כך:*

*(6)*

*חשוב לזכור כי קירוב זה תקף רק עבור אותות קטנים. איך מוגדר אות קטן? תלוי בדרישה, במעגל ובדיודה. עבור אותות בעלי מגניטודה גדולה לא נוכל לבצע את הקרובים שהובילו לסכמת התמורה הנ"ל. למעשה באזור בו אות הכניסה זז מסביב ל-0 נקבל התנגדות מאוד גדולה מהדיודה, שתוביל לאות מקוטע. נוכל להשתמש ביכולת זו של הדיודה כדי לקטוע אותות במיקום מסוים ולייצר אפליקציות שימושיות כמו הפיכת זרם חילופין לזרם ישר (מישר זרם/מתח) לשימוש במכשירי חשמל.*

*תמונה שמכילה לוח כיתה, טקסט

התיאור נוצר באופן אוטומטינראה שימוש עבור האופי הקיבולי של הדיודה : דיודת וריקאפ.  
עבור מעגל LC מקבילי תדר התהודה הוא . תדר התהודה הוא התדר האופייני של המערכת בו עכבת המערכת ממשית טהורה. נבנה מעגל בעזרת רכיבים חשמליים שאנו מכירים וננתח אותו.*

*נגד הוא נגד משתנה שתפקידו לבצע חלוקת מתח בינו לבין שאר המעגל. עבור דיודת וריקאפ ניתן לדעת מהם ערכי הקיבול המתקבלים עבור מתח מסוים לפי עלון המידע של הדיודה. לדוגמא בעלון המצורף (8) קיבול הדיודה במתח 1.2 וולט ותדירות 1 מגה הרץ משתנה בין 388.1 ל-459.1 פיקו פראד. אם כן תדר התהודה של המעגל הנתון עבור ערך השראות הסליל של 1 הנרי ינוע בין 7.427 לבין 8.078 מילי הרץ. (7)*

*תמונה שמכילה צילום מסך

התיאור נוצר באופן אוטומטי*

*(8)*

*Khan academy – semiconductors (1)*

*Jordan Edmunds introduction to semiconductor physics and devices YouTube (2,3)*

*חוברת הרצאות שחר בר (4,5)*

*אילן שליש הרצאה 0 של דיודה (6)*

*Voltage controlled capacitors – varactor diode YouTube (7)*