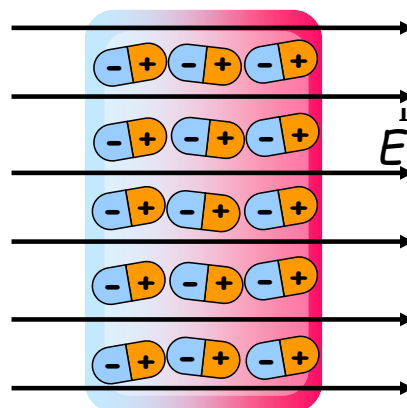


חשמל

קיבול חשמלי

חלק ד' - דיאלקטריות

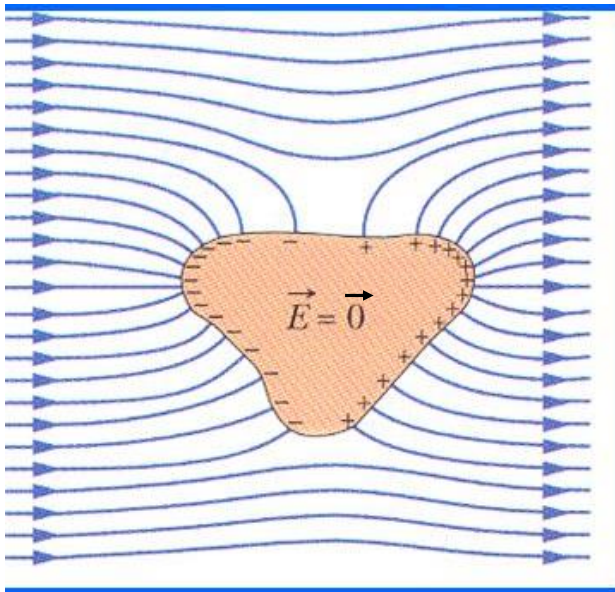


- ◀ השפעת השדה החשמלי על חומר מוליך.
- ◀ השפעת השדה החשמלי על חומר מבודד :
 - מולקולה רגילה.
 - מולקולה קוטבית (פולארית).
- ◀ דיאלקטרן.
- ◀ הכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל.
- ◀ הגדלת הקיבול בשל נוכחות דיאלקטרן.
- ◀ מקדמים דיאלקטריים יחסיים.
- ◀ יתרונות השימוש בדיאלקטרן.
- ◀ השימוש במקדם הדיאלקטרי בנוסחאות.
- ◀ היבטים אנרגטיים.
- ◀ העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל.
- ◀ דיאלקטרנים מפוצלים.

כאשר מכניסים גוש חומרי נייטרלי, שאינו טעון, לתוך אזור בו שורר שדה חשמלי-יוצר השדה מטען מושרה על שפות הגוש.

הכרנו תופעה זו כאשר הכנסנו **חומר מוליך נייטרלי** אל תוך אזור בו שורר שדה חשמלי. השדה גרם לתנועת אלקטרונים חפשיים בתוך המוליך בכיוון מנוגד לקווי השדה ובכך נוצר קיטוב חשמלי של הגוש המוליך. קיטוב זה גרם להתאפסות השדה בתוך המוליך עצמו: (קיטוב בלעז: פולריזציה).

כלומר-שדה חשמלי מקטב את החומר המוליך עד כדי התאפסות השדה בתוך המוליך.



כאשר נכניס גוש העשוי מחומר **מבודד** אל תוך אזור בו שורר שדה חשמלי-המצב יהיה שונה. על כך-בשקופית הבאה.

השפעת שדה חשמלי על חומר מְבִדָד (1)

◀ כדי להבין כיצד משפיע שדה חשמלי על פילוג המטען בתוך חומר מבדד עלינו לזכור כי במבדד אין אלקטרונים חופשיים ולכן לא יזרמו אלקטרונים אל שטח הפנים של הגוש המבדד. כדי להבין את אשר יתרחש - נערוך היכרות ראשונית עם מבנה המולקולות (בעברית-פְּרוֹדוֹת) של חומר.

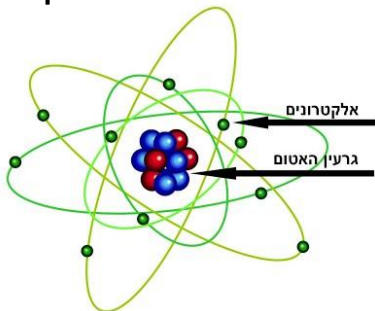
◀ שני סוגי מולקולות מאפיינים את הרכבו של חומר:

1. מולקולה רגילה

2. מולקולה קוטבית (פולארית).

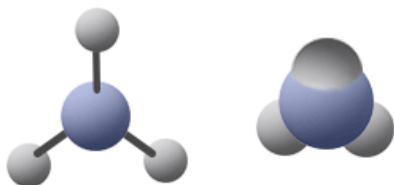
מולקולה רגילה

◀ אטום של יסוד מורכב (בְּאֶפִּיוֹן פשטני) מגרעין חיובי וקליפות אלקטרונים (שליליים) הסובבים סביב הגרעין במהירות עצומה:



מהיבט החשמלי ניתן לראות זאת כמרכז חשמלי חיובי אשר סביבו-שכבות טעונות שלילית אשר מרכז המטען שלהן מתלכד עם מרכז המטען החיובי.

◀ מולקולה רגילה נוצרת גם כאשר מתלכדים מספר אטומים והופכים לתְּרַכָּבֶת המאופיינת ע"י סידור **סימטרי** של אטומים:



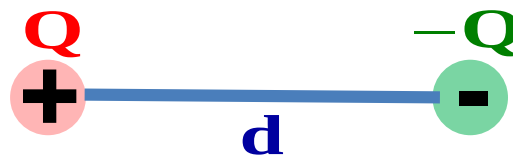
עדיין מרכז המטען השלילי מתלכד עם מרכז המטען החיובי.

לפיכך-מולקולה רגילה מאופיינת חשמלית בכך שמרכזי המטען שלה (חיובי ושלילי)-מתלכדים.

מולקולה קוטבית (פולארית).

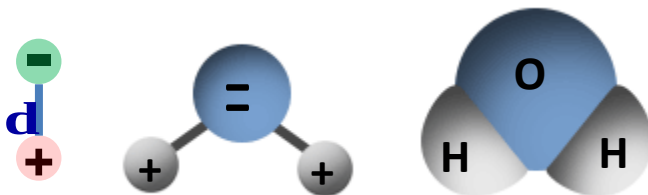
מולקולה קוטבית הינה תרכובת של יסודות שונים זה מזה, כך שהמבנה הצורני של המולקולה יוצר הפרדה בין המרכז החשמלי החיובי של המולקולה לבין המרכז השלילי שלה, ובכך נוצר **דו-קוטב** (דיפול) חשמלי.

דו-קוטב חשמלי ניתן לתיאור סכימטי כשני מטענים, שווי גודל והפוכי סימן, המוחזקים מרוחקים זה מזה מרחק d :



בטבע נוצרות גם מולקולות קוטביות בחומרים מסוימים, כמו למשל מולקולת מים. מולקולת מים מורכבת משני אטומי מימן המתרכבים עם אטום חמצן אחד ונוצרת התרכובת: H_2O . (**H** - מימן ; **O** - חמצן).

כל אטום מימן "מאבד" אלקטרון לטובת אטום החמצן וכך נוצרת מולקולה בה אטומי המימן מופרדים מאטום החמצן כמתואר באיור הבא:

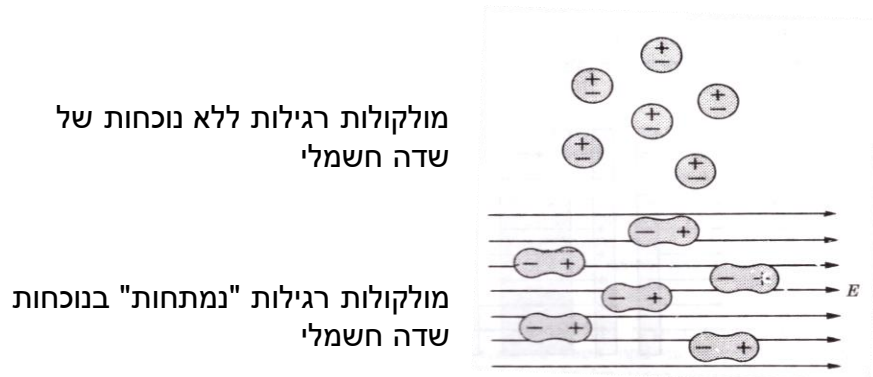


בשקופית הבאה נראה איך מתנהגת מולקולה רגילה ואיך מתנהגת מולקולה קוטבית בנוכחות שדה חשמלי.

השפעת שדה חשמלי על חומר מבודד (3)

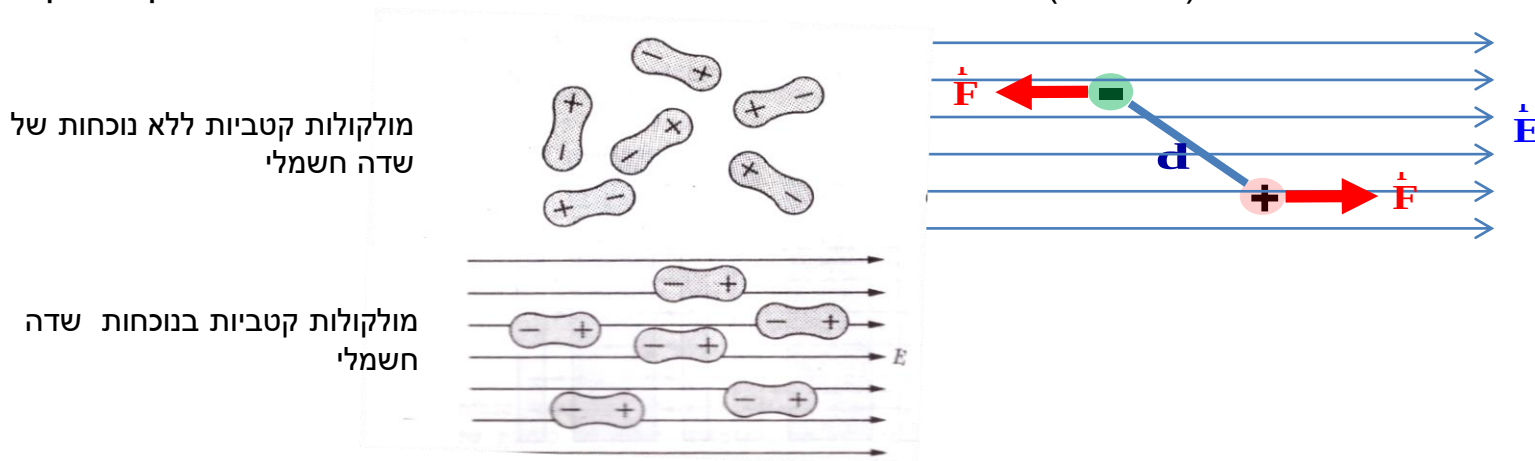
מולקולה רגילה של חומר מבודד הנמצאת בתוך שדה חשמלי :

מאחר והחומר אינו מוליך, לא יתרחש ניתוק אלקטרון מאטומו אלא "מתיחה" של המולקולה :



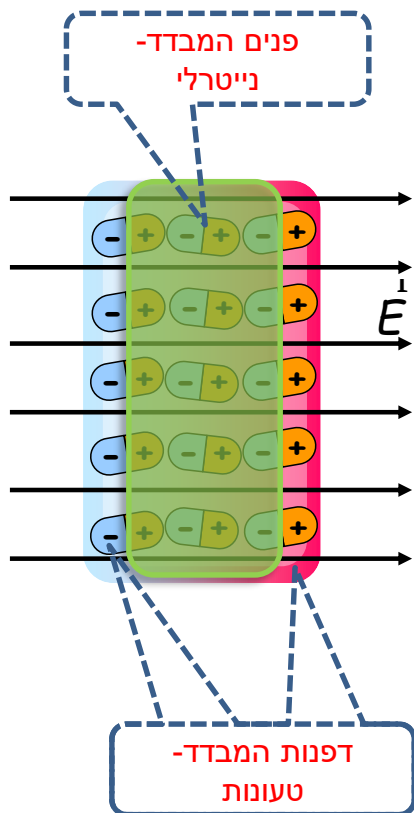
מולקולה קוטבית (דיפול) של חומר מבודד הנמצאת בתוך שדה חשמלי :

השדה יוצר צמד כוחות הפועל על הדיפול (ראו איור) וגורם לדיפול להסתובב "ולהתיישר" עד אשר ציר הדיפול יקביל לקווי השדה:



מכאן: גם מולקולה רגילה וגם מולקולה קוטבית, "מתיישרות" בנוכחות שדה חשמלי במקביל לקווי השדה. (התנהגות זו מאפשרת הגדלת קיבול של קבל, כפי שנראה בשקופיות הבאות).

כאשר מכניסים חומר מבודד אל תוך איזור בו שורר שדה חשמלי – קטן השדה החשמלי בתוך החומר. תופעה זו נצפתה ואושרה בניסויי מעבדה. והיא נובעת מתופעת ההשראה החשמלית.



הסבר התופעה

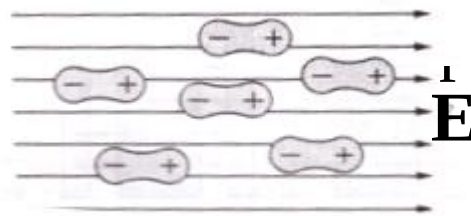
- החומר המבודד מורכב ממולקולות קוטביות (פולריות) או רגילות המסודרות באופן אקראי.
- כאשר נכניס את המבודד לשדה חשמלי, חלק מהמולקולות יסתדר כך שהקוטב החיובי שלהן יידחה ימינה ע"י השדה החשמלי והקוטב השלילי ימשך שמאלה ע"י השדה החשמלי.
- כך יוצר מצב בו דפנות המבודד תהיינה טעונות ואילו לחלקו הפנימי של המבודד נוכל להתייחס כאל אזור לא טעון, משום נטרול הדדי של מטענים חיוביים ושליליים (ראו איור).
- מאחר ובדפנות המבודד נוצר קיטוב חשמלי, יוצר קיטוב זה שדה חשמלי מנוגד לכיוון השדה הקיים במרחב. לכן השדה החשמלי בתוך המבודד קטן.

הערה : בחומר מוליך ישנה הפרדה ממשית בין מטענים חיוביים למטענים שלילים לפיכך ה"קיטוב" חזק יותר.

◀ דיאלקטרן הינו שכבה של חומר מבדד העשוי ממולקולות רגילות או פולריות.

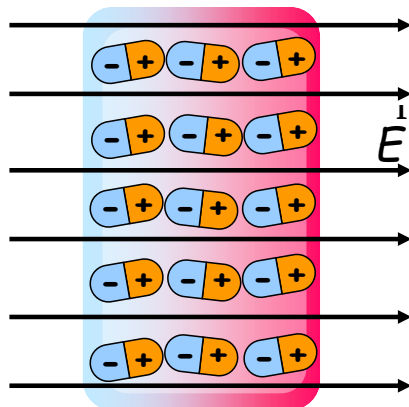
◀ חלק ממולקולות אלו מתקטבות בהשפעת שדה חשמלי והופכות לדיפולים מכוונים :

מולקולות מקוטבות
בהשפעת שדה חשמלי



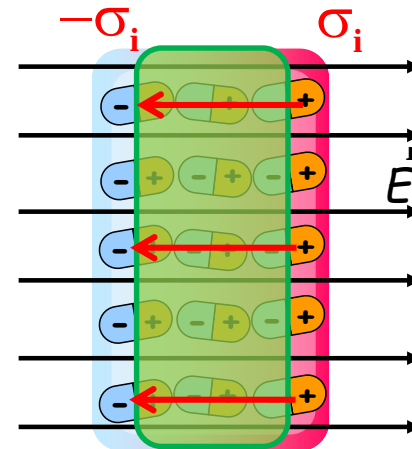
הערה: הקיטוב הינו **חלקי** ופרופורציוני לעצמת השדה החשמלי. כלומר, אם נחזק את השדה החשמלי פי 2 גם מספר המולקולות שתהפוכנה לדיפולים מכוונים-יגדל פי 2.

◀ התנהגות לוח דיאלקטרי בנוכחות שדה חשמלי:



איור א'

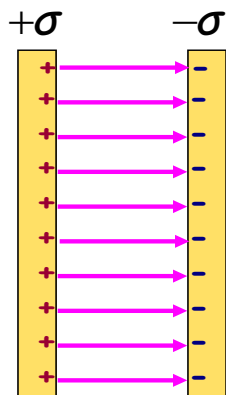
דיפולים מכוונים
מקבילים לקווי השדה



איור ב'

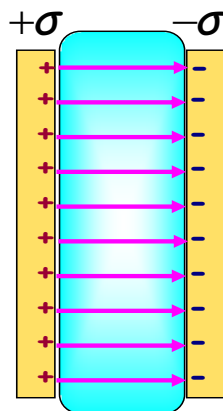
אפקטיבית נוצר מטען מושרה על שפות הדיאלקטרן אשר צפיפותו המשטחית מסומנת ב σ_i . האות i מייצגת את המונח: השראה (induction). המטען המושרה יוצר שדה חשמלי נגדי (החיצים האדומים) שמחליש את השדה האפקטיבי בתוך הלוח הדיאלקטרי.

◀ נתאר את התהליך בעת הכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל:



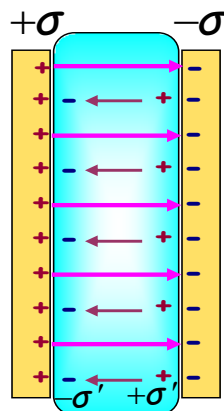
א'

תרשים א' מראה את התפלגות המטען על לוחות הקבל והשדה החשמלי בין הלוחות ללא הדיאלקטרן.



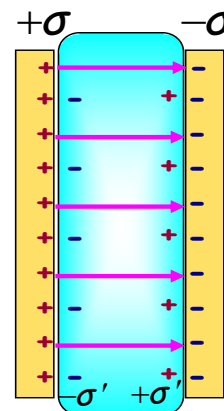
ב'

בתרשים ב' מכניסים את הדיאלקטרן, הממלא את כל נפח הקבל, כאשר זמנית לא נראה שינוי.



ג'

תרשים ג' מראה את הקיטוב החשמלי הנוצר בדיאלקטרן ויצירת שדה חשמלי הנוצר מקיטוב זה בתוך הדיאלקטרן כשהוא מנוגד לכיוון השדה המקורי של הלוחות.

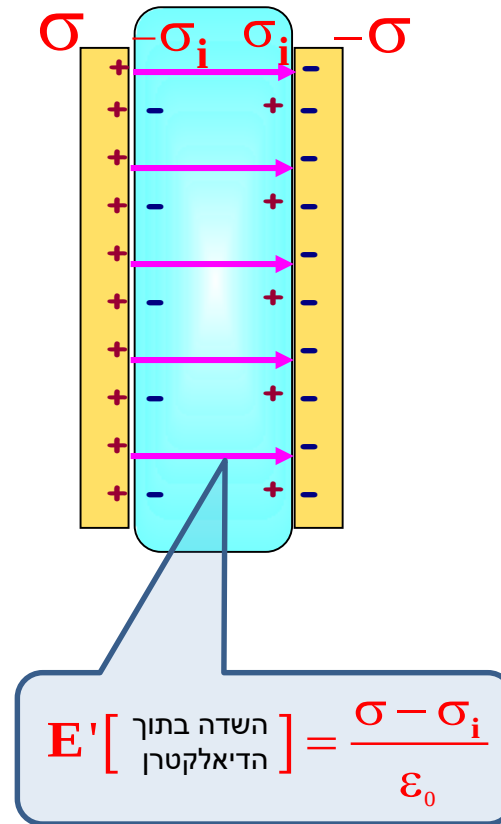
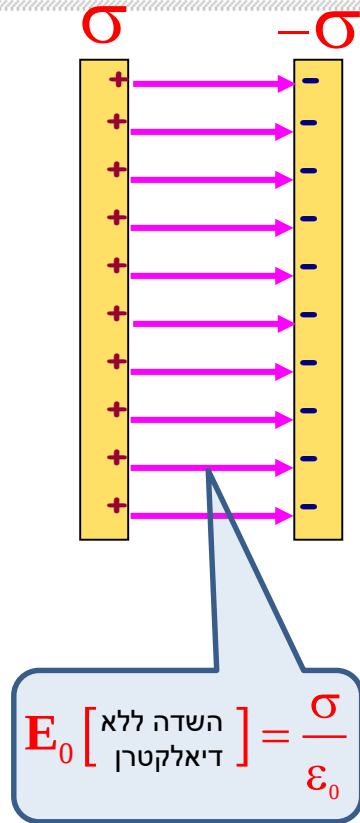


ד'

תרשים ד' מראה את התוצר הסופי, הקטנת השדה החשמלי בין לוחות הקבל הנובעת מהכנסת הדיאלקטרן.

◀ התוצאה הנובעת מכך שמכניסים דיאלקטרן אל תוך קבל היא **החלשת השדה החשמלי** בתוך הקבל.

הדיאלקטרון מגדיל את קיבול הקבל



הרווחנו קיבול גדול יותר.

הסבר:

מאחר והשדה החשמלי נחלש-הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות קטן שכן $V = E \cdot d$. (d הוא המרחק בין לוחות הקבל). ואילו מטען הקבל נותר ללא שינוי.

הקיבול מוגדר כיחס בין מטען הקבל לבין הפרש הפוטנציאלים, כך: $C \equiv \frac{Q}{V}$ (נותר ללא שינוי) (הקיבול-גדל) (קטן)

פי כמה הקיבול גדל? -על כך בשקופית הבאה.

חישוב הגידול בקיבול הקבל בשל נוכחות דיאלקטרון (1)

הגדרות:

נגדיר שלושה פרמטרים:

1. מקדם דיאלקטרי של ריק (ואקום) שיסומן ב: $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{C^2}{Nm^2} \right]$. (הכרנו כבר את הקשר: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$).

2. מקדם דיאלקטרי של חומר מבדד, שיסומן ב: ϵ .

3. מקדם דיאלקטרי יחסי של חומר מבדד, שיסומן ב: $\epsilon_r = \epsilon_{\text{relative}}$ ויוגדר כ: $\epsilon_r \equiv \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

בשקופית הקודמת הראנו שהשדה החשמלי בתוך הקבל, בנוכחות דיאלקטרון, הוא: $E' \left[\begin{array}{l} \text{השדה בתוך} \\ \text{הדיאלקטרון} \end{array} \right] = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0}$

ואילו השדה בתוך הקבל, ללא נוכחות דיאלקטרון, הוא: $E_0 \left[\begin{array}{l} \text{השדה ללא} \\ \text{דיאלקטרון} \end{array} \right] = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

היחס בין השדות: $\frac{E'}{E_0} = \frac{\frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0}}{\frac{\sigma}{\epsilon_0}} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma}$ (השדה בתוך הדיאלקטרון) / (השדה ללא דיאלקטרון)

המשך בשקופית הבאה:

חישוב הגידול בקיבול הקבל בשל נוכחות דיאלקטרן (2)

◀ נסמן את קיבול הקבל המכיל דיאלקטרן ב- C_0 .

ואת קיבולו כשאינו מכיל דיאלקטרן ב- C' .

$$\frac{C' \left[\begin{array}{c} \text{עם דיאלקטרן} \\ \text{ללא דיאלקטרן} \end{array} \right]}{C_0} = \frac{Q/V'}{Q/V_0} = \frac{V_0}{V'} = \frac{E_0 d}{E' d} = \frac{E_0}{E'} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma \\ \sigma - \sigma_i \end{array} \right. \quad \text{נוכל לרשום:}$$

ראו שקופית קודמת

נחלק את המונה והמכנה ב: σ , צפיפות המטען שעל פני לוחות הקבל.

$$\frac{C'}{C_0} = \frac{\sigma}{\sigma - \sigma_i} = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}} \quad \text{נקבל:}$$

◀ כפי שכבר הזכרנו בשקופית קודמת, היחס $\frac{\sigma_i}{\sigma}$ הינו קבוע עבור חומר דיאלקטרי נתון.

לכן הביטוי: $\frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}}$ קבוע אף הוא עבור אותו חומר דיאלקטרי. ביטוי זה מגדיר את המקדם הדיאלקטרי היחסי

$$\epsilon_r \text{ של החומר הדיאלקטרי. כלומר: } \epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}} \quad \text{ומכאן: } \frac{C' \left[\begin{array}{c} \text{עם דיאלקטרן} \\ \text{ללא דיאלקטרן} \end{array} \right]}{C_0} = \epsilon_r$$

בשקופית הבאה נראה שהקיבול אכן גדל בשל נוכחות הדיאלקטרן....

חישוב הגידול בקיבול הקבל בשל נוכחות דיאלקטרן (3)

◀ קיבלנו, אפוא :

$$\frac{C' \left[\begin{array}{c} \text{עם דיאלקטרן} \end{array} \right]}{C_0 \left[\begin{array}{c} \text{ללא דיאלקטרן} \end{array} \right]} = \epsilon_r$$

◀ כאשר :

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}}$$

או :

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{Q_i}{Q}}$$

◀ מאחר וצפיפות המטען המושרה על דפנות הדיאלקטרן σ_i קטנה מצפיפות המטען על לוחות הקבל σ

הביטוי: $\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}}$ הוא בהכרח גדול מ-1. לכן :

$$\frac{C' \left[\begin{array}{c} \text{עם דיאלקטרן} \end{array} \right]}{C_0 \left[\begin{array}{c} \text{ללא דיאלקטרן} \end{array} \right]} > 1$$

◀ כלומר : $C' > C$. הדיאלקטרן גרם להגדלת הקיבול פי ϵ_r .

$$C' = \epsilon_r C$$

כאשר :

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}} > 1$$

מקדמים דיאלקטריים של חמרים מבדדים שונים.

◀ כפי שכבר אמרנו- הדיאלקטרן יוצר מטענים מושרים על שפותיו. מטענים אלה יוצרים שדה חשמלי שכיוונו הפוך לשדה החשמלי החיצוני ולכן-השדה, בתוך הדיאלקטרן, נחלש, הפרש הפוטנציאלים בין מוליכי הקבל-קטן ולכן הקיבול גדל.

◀ על פי חישובינו הקיבול גדל פי ε_r .

◀ המקדם הדיאלקטרי היחסי של החומר הדיאלקטרי ε_r , תלוי בסוג החומר (המבדד).

הערה : גם עבור חומר מבדד מסויים המקדם הדיאלקטרי יכול להשתנות כתלות במיקום בתוך התווך הדיאלקטרי, תדירות השדה החשמלי, לחות ולעיתים גם בעצמת השדה החיצוני.

אנחנו נניח בשלב זה של לימודינו כי בטמפרטורה קבועה- ערכו של המקדם הדיאלקטרי היחסי ε_r הוא ערך קבוע עבור חומר דיאלקטרי נתון.

◀ להלן טבלת מקדמים דיאלקטריים יחסיים של מספר חמרים מבדדים שונים בטמפרטורת החדר :

מס	זכוכית	גומי	אוויר	ריק	החומר
78.3	5 – 10	2 – 3	1.0006	1	מקדם דיאלקטרי יחסי

◀ הכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל משפרת את יעילות הקבל בשלושה היבטים:

1. עצם נוכחות הדיאלקטרן גורמת להגדלת קיבול הקבל
(פי ϵ_r).

2. הדיאלקטרן יוצר הפרדה פיסית בין מוליכי הקבל ומונע מהם להיצמד זה לזה (מוליכי הקבל מושכים זה את זה וללא הפרדה פיסית של מבדד הם היו "נדבקים" זה לזה).

3. השכבה הדיאלקטרית יכולה להיות דקה מאד וכך ניתן לקרב מאד את מוליכי הקבל זה לזה וע"י כך לגרום להגדלה נוספת של קיבול הקבל. (ככל שמוליכי הקבל קרובים יותר זה לזה-קיבול הקבל- גדל).

◀ הגדרת המקדם הדיאלקטרי של חומר מבדד : $\epsilon \equiv \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, מאפשר שימוש נגיש ונוח בכל הנוסחאות המוכרות באלקטרוסטטיקה, כאשר במערכת נוכח דיאלקטרן.

◀ כל שעלינו לעשות להחליף את המקדם הדיאלקטרי של ריק (ואקום) ϵ_0 במקדם הדיאלקטרי של החומר : $\epsilon \equiv \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ בכל נוסחא בה הוא מופיע.

◀ הטבלה הבאה ממחישה זאת במספר דוגמאות :

הערות	עם דיאלקטרן	ללא דיאלקטרן	
הקבוע קטן פי ϵ_r	$k' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$	$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	קבוע קולון
הכח נחלש פי ϵ_r	$F' = \frac{kQq}{\epsilon_r r^2}$	$F = \frac{kQq}{r^2}$	כח חשמלי
השדה נחלש פי ϵ_r	$ \vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon_r}$	$ \vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$	שדה חשמלי בתוך קבל לוחות
הקיבול גדל פי ϵ_r	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A}{d}$	$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$	קיבול של קבל לוחות

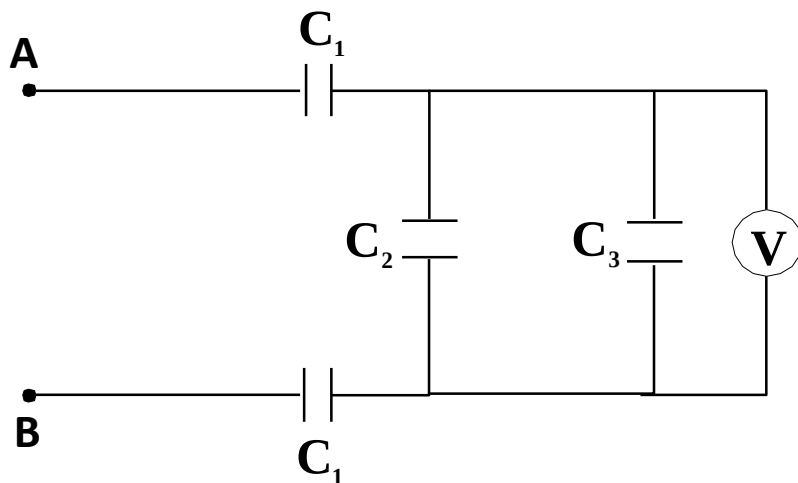
◀ מערכת הקבלים המתוארת בתרשים כוללת שני קבלים בעלי קיבול $C_1 = 16 \mu\text{F}$ ושני קבלים נעלמים C_2 ו- C_3 .

בתוך הקבל C_3 ישנו דיאלקטרן בעל קבוע דיאלקטרי $\epsilon_r = 3$ (C_3 הוא קיבולו כשהוא מכיל דיאלקטרן). במקביל למערכת מחובר וולטמטר (בעל התנגדות פנימית אינסופית וקיבול זניח).

כאשר מחברים את המערכת בין הנקודות A ו- B למתח 20 וולט מראה הוולטמטר 4 וולט. כאשר מוציאים את הדיאלקטרן מתוך הקבל C_3 מראה הוולטמטר 5 וולט.

א- חשבו את ערכי הקיבול : C_2 ו- C_3 .

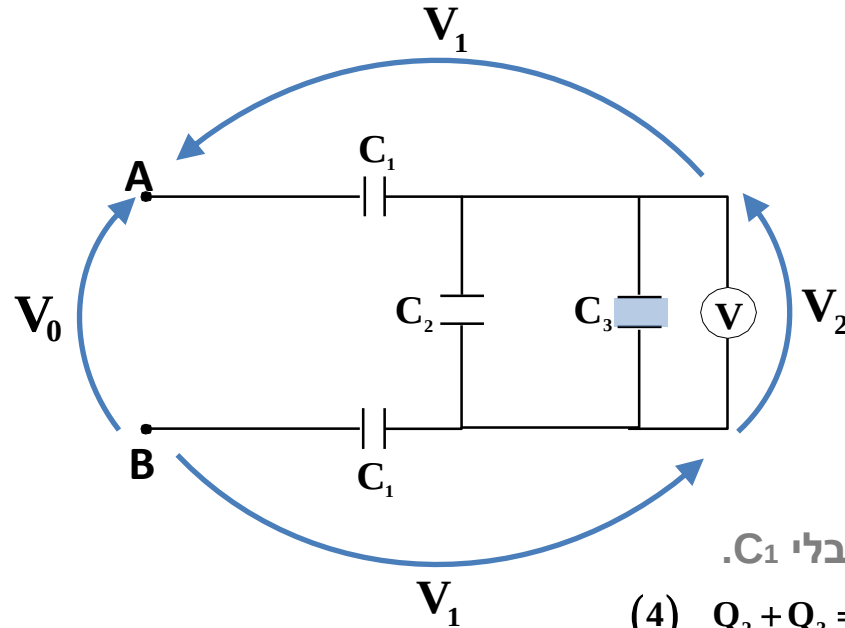
ב- חשבו את גדלו של המטען המושרה על דפנות הדיאלקטרן בטרם הוציאו אותו מהקבל.



1. לפני הוצאת הדיאלקטרן :

נסמן את מתח המקור ב: $V_0 = 20_{(v)}$ ואת הוריית הוולטמטר ב: $V_2 = 4_{(v)}$.

את המתח על כל קבל C_1 נסמן ב: V_1 .



כעת נוכל לרשום:

$$(1) \quad V_0 = 2V_1 + V_2$$

$$(2) \quad V_1 = \frac{V_0 - V_2}{2} = \frac{20 - 4}{2} = 8_{(v)}$$

נחשב את המטען על כל קבל מסוג C_1 :

$$(3) \quad Q_1 = C_1 \cdot V_1 = 16_{\mu F} \cdot 8_{(v)} = 128_{(\mu C)}$$

קבלים C_2 ו C_3 מחוברים ביניהם במקביל ושניהם טוריים לקבלי C_1 .

$$(4) \quad Q_2 + Q_3 = Q_1 = 128_{\mu C} \quad \text{הוא } C_3 \text{ ו } C_2 \text{ של הקבלים המשותף}$$

הקיבול השקול של קבלים C_2 ו C_3 (מחוברים במקביל) הוא: $C_2 + C_3$. והמתח "הנופל" עליהם הוא: V_2 .

נוכל לרשום:

$$(5) \quad \underbrace{Q_2 + Q_3}_{128_{\mu C}} = (C_2 + C_3) \underbrace{V_2}_{4_v}$$

$$(6) \quad 128_{\mu C} = (C_2 + C_3) \cdot 4_v \quad \text{נציב ערכים מספריים:}$$

$$(7) \quad C_2 + C_3 = 32_{\mu F} \quad \text{נקבל משוואה המכילה שני נעלמים:}$$

פתרון דוגמא (1)-דף 2

המשך פתרון סעיף א':

1. אחרי הוצאת הדיאלקטרן :

נסמן את מתח המקור ב: $V_0 = 20_{(V)}$ ואת הוריית הוולטמטר ב: $V'_2 = 5_{(V)}$.

את המתח על כל קבל C_1 נסמן ב: V'_1 .

כעת נוכל לרשום:

$$(1') \quad V_0 = 2V'_1 + V_2$$

$$(2') \quad V'_1 = \frac{V_0 - V_2}{2} = \frac{20 - 5}{2} = 7.5_{(V)}$$

נחשב את המטען על כל קבל מסוג C_1 :

$$(3') \quad Q'_1 = C_1 \cdot V'_1 = 16_{\mu F} \cdot 7.5_{(V)} = 120_{(\mu C)}$$

קבלים C_2 ו C'_3 מחוברים ביניהם במקביל ושניהם טוריים לקבלי C_1 .

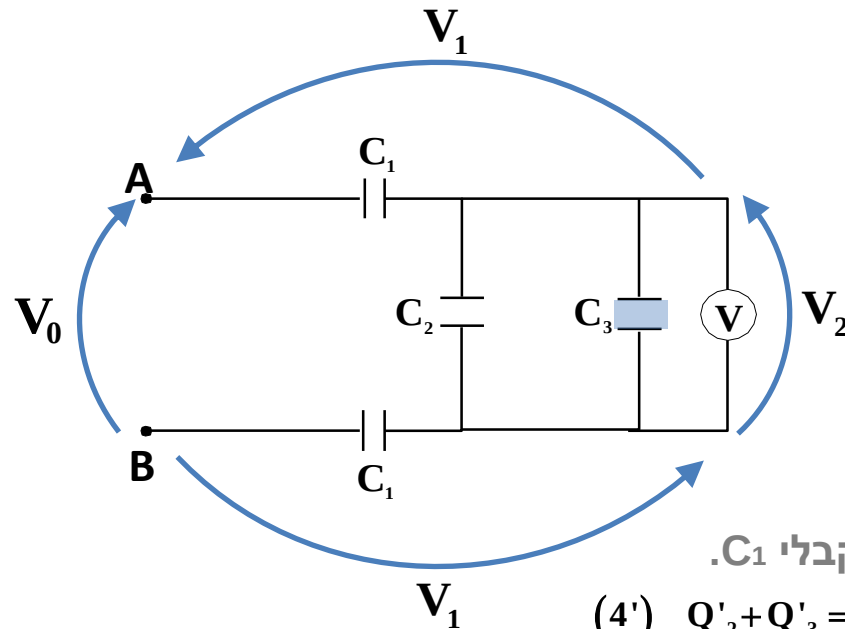
מכאן-מטענם המשותף של הקבלים C_2 ו C'_3 הוא: $Q'_2 + Q'_3 = Q'_1 = 120_{\mu C}$ (4')

הקיבול השקול של קבלים C_2 ו C'_3 (מחוברים במקביל) הוא: $C_2 + C'_3$. והמתח "הנופל" עליהם הוא: V'_2 .

$$(5') \quad \underbrace{120_{\mu C}}_{Q'_2 + Q'_3} = (C_2 + C'_3) \underbrace{5_V}_{V'_2} \quad \text{נוכל לרשום:}$$

$$(6') \quad 120_{\mu C} = (C_2 + C'_3) \cdot 5_V \quad \text{נציב ערכים מספריים:} \quad C'_3 = \frac{C_3}{\epsilon_r} = \frac{C_3}{3} \quad \text{אבל:}$$

$$(7') \quad C_2 + C'_3 = C_2 + \frac{C_3}{3} = 24_{\mu F} \quad \text{נקבל משוואה המכילה שני נעלמים:}$$



פתרון סעיף א' (המשך) :

נרשום שוב את משוואות (7) ו (7') : $C_2 + C_3 = 32_{\mu F}$ (7)

$$(7') \quad C_2 + \frac{C_3}{3} = 24_{\mu F}$$

מחיסור המשוואות : (7)-(7') נקבל : $\Rightarrow C_3 = 12_{\mu F}$ (8) $\frac{2C_3}{3} = 8_{\mu F}$

נציב במשוואה (7) ונקבל: $C_2 + 12 = 32_{\mu F} \Rightarrow C_2 = 20_{\mu F}$ (9)

פתרון סעיף ב'

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{Q_i}{Q}}$$

1. פיתחנו את הקשר בין המטען המושרה על שפות הדיאלקטרן לבין מטען הקבל וקיבלנו :

$$\Rightarrow \epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{Q_i}{Q_3}} \Rightarrow \frac{Q_i}{Q_3} = 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \Rightarrow Q_i = Q_3 \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)$$

2. מטענו של הקבל C3 כאשר הדיאלקטרן היה בתוכו הוא: $Q_3 = C_3 V_1 = 12_{\mu F} \cdot 4_V = 48_{\mu C}$

3. נציב ערכים מספריים :

$$Q_i = 48_{\mu C} \left(1 - \frac{1}{3} \right) = 32_{\mu C}$$

◀ מאחר ודיאלקטרן מגדיל קיבול-חל שינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל בשל הכנסת דיאלקטרן לתוכו.

◀ כאן עלינו להפריד בין שני מקרים:

1. אנרגית קבל המכיל דיאלקטרן כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

(C מייצג את הקיבול כשהקבל אינו מכיל דיאלקטרן)

קבל ללא דיאלקטרן	קבל המכיל דיאלקטרן	הערות
$U = \frac{Q^2}{2C}$	$U = \frac{Q^2}{2C\epsilon_r}$	אנרגית הקבל קטנה בנוכחות דיאלקטרן

2. אנרגית קבל המכיל דיאלקטרן כאשר הקבל מחובר לסוללה.

(C מייצג את הקיבול כשהקבל אינו מכיל דיאלקטרן)

קבל ללא דיאלקטרן	קבל המכיל דיאלקטרן	הערות
$U = \frac{1}{2}CV^2$	$U = \frac{1}{2}C\epsilon_r V^2$	אנרגית הקבל גדלה בנוכחות דיאלקטרן

העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל (1)

- ◀ נושא זה טופל כבר באופן כללי כשערכנו דיון על העבודה החיצונית שיש לבצע על מנת לשנות את קיבולו של הקבל (ראו מצגת חלק ב' בקיבול).
- ◀ הכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל גוררת הגדלת קיבול של אותו קבל.
- ◀ לשם נוחות נזכיר כאן את התוצאות שקיבלנו :

העבודה החיצונית הכרוכה בשינוי קיבולו של קבל : (ראו מצגת חלק ב' בקיבול)

1. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

$$(1) \quad W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

negative if $C_2 > C_1$

2. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל מחובר לסוללה.

$$(2) \quad W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 \cdot C = -\frac{1}{2} V_0^2 (C_2 - C_1)$$

positive if $C_2 > C_1$

העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל (2)

1. העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל הקבל כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה:

(C_2 מייצג את קיבול הקבל אחרי הכנסת הדיאלקטרן).

(C_1 מייצג את קיבול הקבל לפני הכנסת הדיאלקטרן).

$$(1) \quad W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_r C_1} - \frac{1}{C_1} \right) = \frac{Q^2}{2C_1} \left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right) < 0$$

$$W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2C_1} \left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right) < 0$$

2. העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל הקבל כאשר הקבל מחובר לסוללה:

(C_2 מייצג את קיבול הקבל אחרי הכנסת הדיאלקטרן).

(C_1 מייצג את קיבול הקבל לפני הכנסת הדיאלקטרן).

$$(2) \quad W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 (C_2 - C_1) = -\frac{1}{2} V_0^2 (\epsilon_r C_1 - C_1) = -\frac{1}{2} V_0^2 C_1 (\epsilon_r - 1)$$

$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 C_1 (\epsilon_r - 1)$$

◀ בשני המקרים העבודה החיצונית להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל היא שלילית. (הסבר בשקופית הבאה)

העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל (3)

ראינו כי בכל מקרה-העבודה החיצונית להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל היא שלילית.

מדוע?

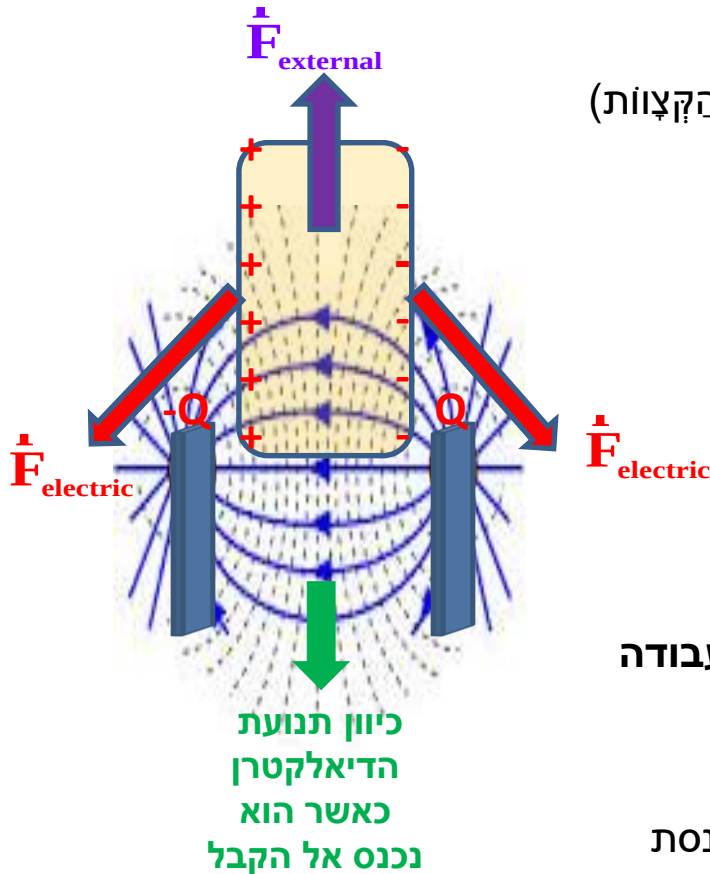
כי השדה החשמלי "הדולף" מהקבל (כלומר שפִּיַת השדה או אֶפֶקט הקצוות) מפעיל כוח המושך את הדיאלקטרן אל תוך הקבל (ראו איור):

שימו לב כי קווי השדה הנובעים משפִּיַת השדה מפעילים כוחות על המטענים המושרים על שפות הדיאלקטרן. שקול הכוחות מושך את הדיאלקטרן אל תוך הקבל.

מאחר והעבודה להכנסת הדיאלקטרן מוגדרת עבור תהליך איטי מאד (קוֹזִיטִיבִּי)-עלינו להפעיל כח חיצוני **הפוך** לכיוון תנועת הדיאלקטרן (כלומר: כח בולם). כח חיצוני זה מבצע, אפוא, עבודה שלילית הגורמת לגריעת אנרגיה מהקבל.

עם זאת, כאשר הקבל מחובר לסוללה, אנרגיית הקבל גְּדֵלָה עם הכנסת הדיאלקטרן, למרות העבודה החיצונית השלילית.

הסבר: כאשר הדיאלקטרן חודר אל תוך הקבל-נבלעים בתוכו קווי שדה ומתח הקבל קטן. תפקיד הסוללה הוא לשמור על מתח קבוע ולכן היא מעבירה, דרכה, מטען נוסף אל הקבל, על מנת להשיב את המתח לערכו המקורי. העברת מטען זו כרוכה בעבודה חיובית שהסוללה מבצעת. עבודה חיובית זו גדולה מערכה המוחלט של עבודת הכוח החיצוני. לכן-אנרגיית הקבל- גְּדֵלָה.



◀ קבל לוחות בעל קיבול C מחובר לסוללה השומרת על מתח קבוע V .
מכניסים דיאלקטרן בעל מקדם יחסי ϵ_r אל תוך הקבל.

א- חשבו את העבודה החיצונית שיש להשקיע (כולל סימן) על מנת להכניס את הדיאלקטרן אל תוך הקבל.

מנתקים את הסוללה ואח"כ מוציאים את הדיאלקטרן מהקבל.

ב- חשבו את העבודה החיצונית שיש להשקיע (כולל סימן) על מנת להוציא את הדיאלקטרן מהקבל.

ג- הראו שהעבודה החיצונית הדרושה להוצאת הדיאלקטרן מהקבל גדולה (בערכה המוחלט) פי ϵ_r מהעבודה שנדרשה להכניסו אל הקבל.

ד- הסבירו את הסיבה הפיסיקלית להפרש בין ערכן המוחלט של שתי העבודות הנ"ל.

◀ בשקופית 21 הצגנו את הנוסחאות לצורך חישוב העבודה לשינוי קיבולו של קבל (כפי שפיתחנו בפרק הקיבול). לנוחותכם נציג אותן שוב :

העבודה החיצונית הכרוכה בשינוי קיבולו של קבל : (ראו מצגת חלק ב' בקיבול)

1. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

$$(1) \quad W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

negative if $C_2 > C_1$

2. העבודה החיצונית הדרושה לשינוי קיבול הקבל כאשר הקבל מחובר לסוללה.

$$(2) \quad W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_1} = -\frac{1}{2} V_0^2 (C_2 - C_1)$$

positive if $C_2 > C_1$

פתרון סעיף א'

העבודה החיצונית לשם שינוי קיבול, כשהקבל מחובר לסוללה:

$$W_{\text{external}_1} = -\frac{1}{2} V^2 (C_2 - C_1) = -\frac{1}{2} V^2 \left(\underbrace{\epsilon_r C}_{C_2} - \underbrace{C}_{C_1} \right) = -\frac{1}{2} V^2 C (\epsilon_r - 1)$$

עבודה זו היא שלילית מאחר והכוחות החשמליים "מושכים" את הדיאלקטרן אל תוך הקבל, לכן עלינו להפעיל כוח הפוך לכיוון תנועת הדיאלקטרן על מנת לגרום לו לחדור אל תוך הקבל בתהליך איטי מאוד (קוויזיטטי).

פתרון סעיף ב'-הסוללה נותקה.

כעת מוציאים את הדיאלקטרן מתוך הקבל, לאחר שהקבל נותק מהסוללה:

$$W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$$

מטענו ההתחלתי של הקבל בשלב זה הוא הרי מטענו הסופי לאחר סיומו של השלב הקודם, כלומר: $Q = \epsilon_r CV$
מטען זה נשאר קבוע בתהליך שליפת הדיאלקטרן משום שהקבל מנותק מהסוללה. לכן:

$$W_{\text{external}_2} = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{\underbrace{C_2}_{\epsilon_r^2 C}} - \frac{1}{\underbrace{C_1}_{\epsilon_r C}} \right) = \frac{Q^2}{2C} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right) \stackrel{Q=\epsilon_r CV}{=} \frac{(\epsilon_r CV)^2}{2C} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right) = \frac{\epsilon_r CV^2}{2} (\epsilon_r - 1)$$

פתרון סעיף ג' ◀

$$\left| \frac{W_{\text{external}_1}}{W_{\text{external}_2}} \right| = \frac{\frac{1}{2} V^2 C (\epsilon_r - 1)}{\frac{1}{2} V^2 C \epsilon_r (\epsilon_r - 1)} = \epsilon_r \quad (\text{מ.ש.ל.})$$

פתרון סעיף ד' ◀

את הסיבה הפיסיקלית לכך שערכה המוחלט של העבודה לשליפת הדיאלקטרן (כאשר הקבל נותק מהסוללה), גדולה מערכה המוחלט של העבודה להכנסת הדיאלקטרן (כאשר הקבל היה מחובר לסוללה), ניתן להסביר בשני אופנים:

1. מטען הקבל בתהליך שליפת הדיאלקטרן, נשאר קבוע וגדול פי ϵ_r ממטענו של הקבל בטרם הוחדר אליו הדיאלקטרן. לכן לוחות הקבל הפעילו כוח גדול יותר על הדיאלקטרן בעת שליפתו מאשר בעת החדרתו.

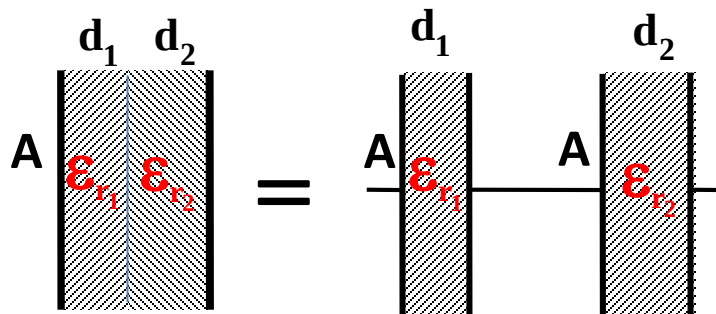
2. בעת החדרת הדיאלקטרן העבודה החיצונית היא שלילית אך מתבצעת גם עבודה (חיובית) ע"י הסוללה. משום שהסוללה מעבירה דרכה מטען נוסף אל הקבל. העבודות מנוגדות בסימן ולכן ישנו קיזוז חלקי של העבודה החיצונית.

בעת שליפת הדיאלקטרן, הסוללה מנותקת ולכן לא נוצר קיזוז כנ"ל.

לעתים נראה בתוך קבל יחיד-מספר דיאלקטריים המונחים זה לצד זה בתצורות (קונפיגורציות) שונות. נערוך היכרות עם שתי תצורות נפוצות :

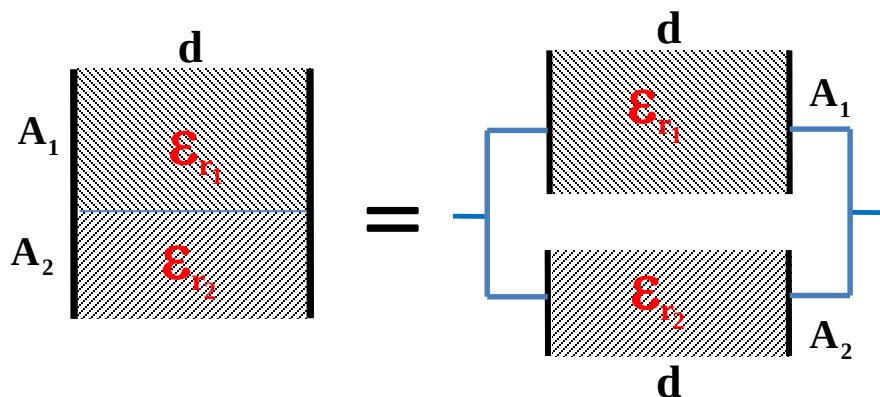
1. דיאלקטריים בטור:

ניתן להפריד קבל המכיל שני דיאלקטריים בטור לשני קבלים טוריים :



2. דיאלקטריים במקביל:

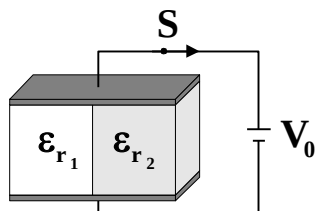
ניתן להפריד קבל המכיל שני דיאלקטריים במקביל לשני קבלים מקביליים.



◀ קבל לוחות בעל קיבול C_0 מחובר למתח V_0 .

א. כאשר מתג S סגור כפי שמתואר בסרטוט :

מכניסים בין לוחותיו שני דיאלקטריים בעלי מימדים שווים ומקדמים דיאלקטריים יחסיים : $\epsilon_{r1} = 2$, $\epsilon_{r2} = 4$. כמוראה באיור :



1. מהו הקיבול החדש C' של הקבל ?

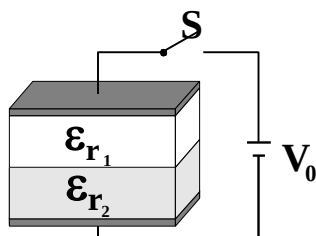
2. מהו השינוי Δq במטען הקבל ?

3. מהו השינוי U באנרגיית הקבל ?

4. מהי העבודה החיצונית המושקעת בהכנסת הדיאלקטריים ?

◀ ב. בנסוי אחר-הקבל מנותק מהסוללה (המתג S פתוח).

מכניסים בין לוחותיו שני דיאלקטריים בעלי מימדים שווים ומקדמים דיאלקטריים יחסיים : $\epsilon_{r1} = 2$, $\epsilon_{r2} = 4$. כמוראה באיור :



1. מהו הקיבול החדש C' של הקבל ?

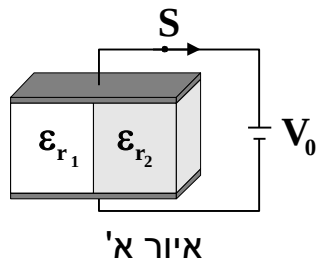
2. מהו הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל לאחר הכנסת הדיאלקטריים ?

3. מהו השינוי U באנרגיית הקבל ?

4. מהי העבודה החיצונית המושקעת בהכנסת הדיאלקטריים ?

א. כאשר מתג S סגור והמתח קבוע (ראו איור א') :

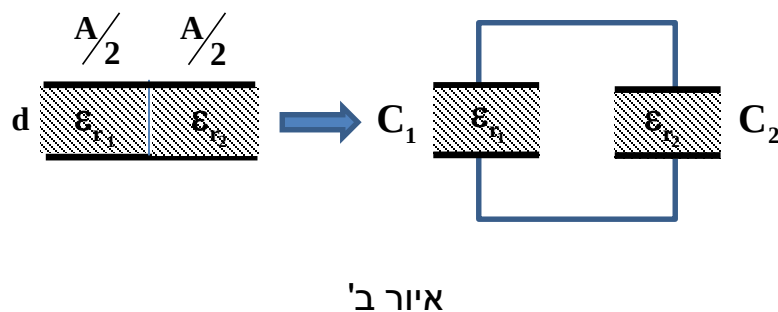
1. חישוב הקיבול החדש C' של הקבל



קיבולו של הקבל המקורי הוא : $C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$.

ניתן להתייחס לקיבול השקול החדש כאל שני קבלים מקביליים. (ראו איור ב') :

כך ש :



$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{2}}{d} = \frac{\epsilon_{r1} C_0}{2} = C_0$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{2}}{d} = \frac{\epsilon_{r2} C_0}{2} = 2C_0$$

מכאן, הקיבול השקול : $C' = C_1 + C_2 = 3C_0$

2. חישוב השינוי Δq במטען הקבל

המטען המקורי על הקבל לפני הכנסת הדיאלקטריים : $q = C_0 V_0$

המטען החדש על הקבל אחרי הכנסת הדיאלקטריים : $q' = C' V_0 = 3C_0 V_0$

מכאן-השינוי במטען הקבל : $\Delta q = q' - q = 3C_0 V_0 - C_0 V_0 = 2C_0 V_0$

3. חישוב השינוי ΔU באנרגיית הקבל

האנרגיה המקורית של הקבל : $U_0 = \frac{1}{2} V_0^2 C_0$

האנרגיה של הקבל לאחר הכנסת הדיאלקטריים : $U' = \frac{1}{2} V_0^2 C' = \frac{1}{2} V_0^2 \cdot 3C_0$

השינוי באנרגיית הקבל : $\Delta U = U' - U_0 = \frac{1}{2} V_0^2 \left(\underset{3C_0}{C'} - C_0 \right) = \underset{V_0^2 C_0}{V_0^2 C_0}$

4. חישוב העבודה החיצונית המושקעת בהכנסת הדיאלקטריים

נחשב זאת מבלי להסתמך על הנוסחא שפיתחנו והראנו בשקופית (26) :

$$(1) \quad W_{\text{external}} + \underset{V_0 \Delta q}{W_{\text{battery}}} = \Delta U \Rightarrow W_{\text{external}} + V_0 \Delta q = \Delta U$$

מתת סעיף (3) קבלנו : $\Delta U = V_0^2 C_0$. וגם קיבלנו [ראו שקופית קודמת, תת סעיף (2)] : $\Delta q = 2C_0 V_0$.

נציב במשוואה (1) ונקבל :

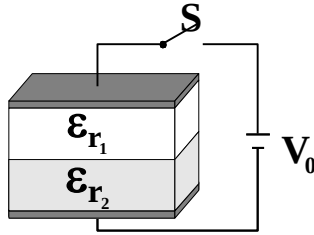
$$(2) \quad W_{\text{EXT}} + \underset{2C_0 V_0}{V_0 \Delta q} = \underset{V_0^2 C_0}{\Delta U}$$

ולאחר העברת אגף וסידור נקבל :

$$W_{\text{EXT}} = -V_0^2 C_0$$

העבודה החיצונית להכנסת הדיאלקטריים היא **שלילית**, כצפוי.

ב. הקבל מנותק מהסוללה (המתג S פתוח).



1. חישוב הקיבול החדש C" של הקבל

קיבולו של הקבל המקורי הוא : $C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

ניתן להתייחס לקיבול השקול החדש כאל שני קבלים טוריים :
כך ש :

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} A}{\frac{d}{2}} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_{r2} A}{d} = 8C_0 \quad C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} A}{\frac{d}{2}} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_{r1} A}{d} = 4C_0$$

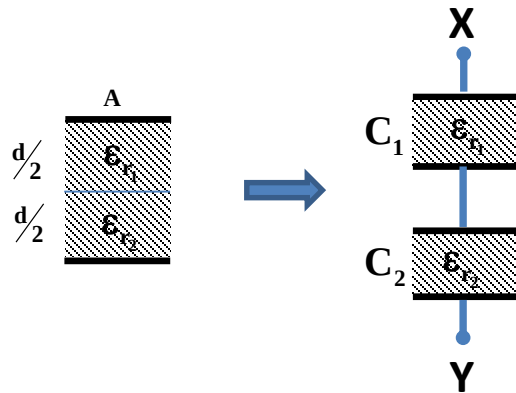
מכאן, הקיבול השקול :

$$C'' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{4 \cdot 8}{4 + 8} C_0 = \frac{8}{3} C_0$$

2. חישוב הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הקבל לאחר הכנסת הדיאלקטריים

המטען המקורי על הקבל לפני הכנסת הדיאלקטריים : $q = C_0 V_0$. מטען זה אינו משתנה כי הקבל מנותק מהסוללה.

מכאן-הפרש הפוטנציאלים החדש על הקבל השקול הוא : $V'' = \frac{q}{C''} = \frac{C_0 V_0}{\frac{8}{3} C_0} = \frac{3}{8} V_0$



3. חישוב השינוי ΔU באנרגיית הקבל

האנרגיה המקורית של הקבל : $U_0 = \frac{q^2}{2C_0}$. כאשר : $q = C_0 V_0$

האנרגיה של הקבל לאחר הכנסת הדיאלקטרנים : $U'' = \frac{q^2}{2C''} = \frac{q^2}{2 \cdot \frac{8}{3} C_0} = \frac{3}{8} U_0$

השינוי באנרגיית הקבל : $\Delta U = U'' - U_0 = \left(\frac{3}{8} - 1 \right) U_0 = -\frac{3}{8} U_0 = -\frac{3}{16} C_0 V_0^2$

4. חישוב העבודה החיצונית המושקעת בהכנסת הדיאלקטרנים

נחשב זאת מבלי להסתמך על הנוסחא שפיתחנו והראנו בשקופית (26) :

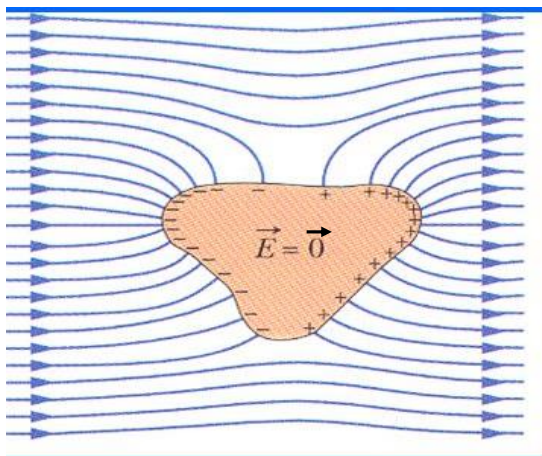
$$W_{\text{external}} = \Delta U \Rightarrow W_{\text{external}} = \Delta U = -\frac{3}{16} C_0 V_0^2$$

העבודה החיצונית להכנסת הדיאלקטרנים היא **שלילית**, כצפוי.

סיכום השעור (1)

◀ **השפעת שדה חשמלי על חומר מוליך :**

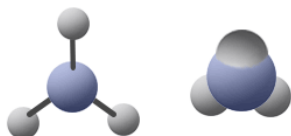
שדה חשמלי מקטב את החומר המוליך עד כדי התאפסות השדה בתוך המוליך.



◀ **סוגי מולקולות המאפיינים את הרכבו של חומר:**

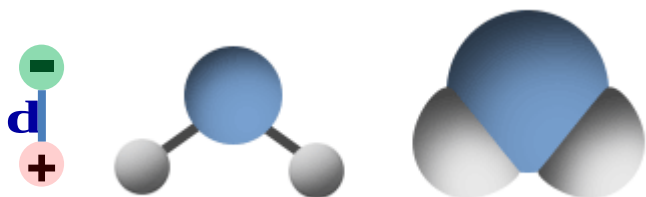
1. מולקולה רגילה

מולקולה רגילה מאופיינת חשמלית בכך שמרכזי המטען שלה (חיובי ושלילי) - מתלכדים:



2. מולקולה קוטבית (פולארית).

מולקולה קוטבית הינה תרכובת של יסודות שונים זה מזה, כך שהמבנה הצורני של המולקולה יוצר הפרדה בין המרכז החשמלי החיובי של המולקולה לבין המרכז החשמלי השלילי שלה, ובכך נוצר דו-קטב (דיפול) חשמלי:

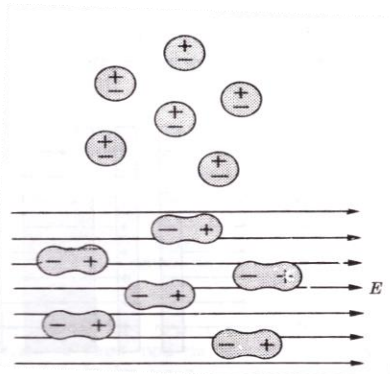


◀ השפעת שדה חשמלי על מוליקולות של חומר מבדד (דיאלקטרן) :

מאחר והחומר אינו מוליך, לא יתרחש ניתוק אלקטרון מאטומו אלא "מתיחה" של המולקולה :

1. מולקולה רגילה של חומר מבדד הנמצאת בתוך שדה חשמלי :

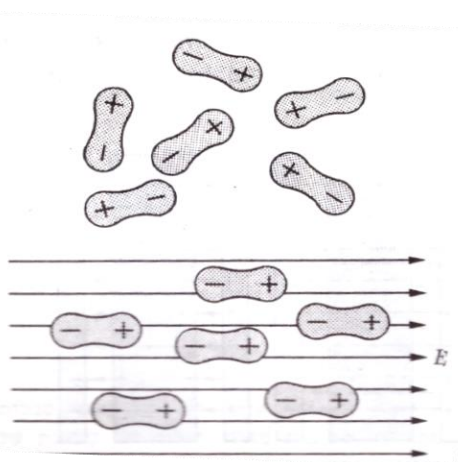
מולקולות רגילות ללא נוכחות של שדה חשמלי



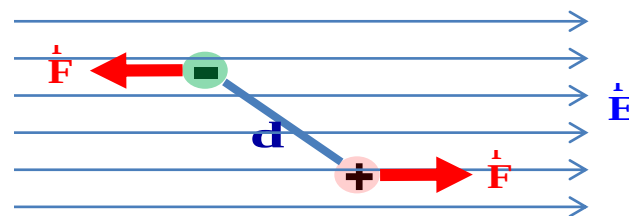
מולקולות רגילות "נמתחות" בנוכחות שדה חשמלי

2. מולקולה קוטבית (דיפול) של חומר מבדד, הנמצאת בתוך שדה חשמלי :

מולקולות קטביות ללא נוכחות של שדה חשמלי

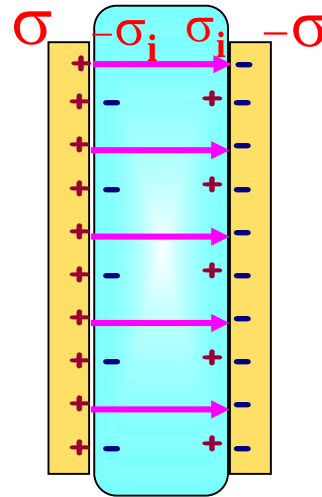


מולקולות קטביות בנוכחות שדה חשמלי



◀ השפעת שדה חשמלי על חומר מבודד (דיאלקטרן) :

השדה שיוצרים לוחות הקבל גורם למטענים מושרים על שפות הדיאלקטרן. מטענים אלה יוצרים שדה חשמלי שכיוונו הפוך לשדה החשמלי המקורי ולכן-השדה, בתוך הדיאלקטרן, נחלש, הפרש הפוטנציאלים בין מוליכי הקבל-קטן ולכן הקיבול גדל.



◀ הגדרות :

הדיאלקטרן גורם להגדלת הקיבול פי ϵ_r .

$$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i}{\sigma}} > 1$$

$$C' = \epsilon_r C_0$$

קיבול הקבל
כשהוא מכיל
דיאלקטרן

קיבול הקבל
ללא
דיאלקטרן

1. מקדם דיאלקטרי של ריק (ואקום) : $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{C^2}{N \cdot m^2} \right]$

2. מקדם דיאלקטרי של חומר מבודד : ϵ

3. מקדם דיאלקטרי 'חסי' של חומר מבודד : $\epsilon_r \equiv \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

◀ **הכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל משפרת את יעילות הקבל בשלושה היבטים:**

1. עצם נוכחות הדיאלקטרן גורמת להגדלת קיבול הקבל
(פי ϵ_r).

2. הדיאלקטרן יוצר הפרדה פיסית בין מוליכי הקבל ומונע
מהם להיצמד זה לזה (מוליכי הקבל מושכים זה את זה וללא
הפרדה פיסית של מבדד הם היו "נדבקים" זה לזה).

3. השכבה הדיאלקטרית יכולה להיות דקה מאד וכך ניתן
לקרב מאד את מוליכי הקבל זה לזה וע"י כך לגרום
להגדלה נוספת של קיבול הקבל. (ככל שמוליכי הקבל
קרובים יותר זה לזה-קיבול הקבל- גדל).

השימוש במקדם הדיאלקטרי בנוסחאות

הגדרת המקדם הדיאלקטרי של חומר מבדד: $\epsilon \equiv \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, מאפשר שימוש נגיש ונוח בכל הנוסחאות המוכרות באלקטרוסטטיקה, כאשר במערכת נוכח דיאלקטרן.

כל שעלינו לעשות להחליף את המקדם הדיאלקטרי של ריק (ואקום) ϵ_0 במקדם הדיאלקטרי של החומר: $\epsilon \equiv \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ בכל נוסחא בה הוא מופיע. כדלקמן:

הערות	עם דיאלקטרן	ללא דיאלקטרן	
הקבוע קטן פי ϵ_r	$k' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$	$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	קבוע קולון
הכח נחלש פי ϵ_r	$F' = \frac{kQq}{\epsilon_r r^2}$	$F = \frac{kQq}{r^2}$	כח חשמלי
השדה נחלש פי ϵ_r	$ \vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon_r}$	$ \vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$	שדה חשמלי בתוך קבל לוחות
הקיבול גדל פי ϵ_r	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A}{d}$	$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$	קיבול של קבל לוחות

היבטים אנרגטיים

מאחר ודיאלקטרן מגדיל קיבול-חל שינוי באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של הקבל בשל הכנסת דיאלקטרן לתוכו.

כאן עלינו להפריד בין שני מקרים:

1. אנרגית קבל המכיל דיאלקטרן כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה.

(C מייצג את הקיבול כשהקבל אינו מכיל דיאלקטרן)

קבל ללא דיאלקטרן	קבל המכיל דיאלקטרן	הערות
$U = \frac{Q^2}{2C}$	$U = \frac{Q^2}{2C\epsilon_r}$	אנרגית הקבל קטנה בנוכחות דיאלקטרן

2. אנרגית קבל המכיל דיאלקטרן כאשר הקבל מחובר לסוללה.

קבל ללא דיאלקטרן	קבל המכיל דיאלקטרן	הערות
$U = \frac{1}{2}CV^2$	$U = \frac{1}{2}C\epsilon_r V^2$	אנרגית הקבל גדלה בנוכחות דיאלקטרן

◀ העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל

1. העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל הקבל כאשר הקבל אינו מחובר לסוללה:

$$W_{\text{external}} = \frac{Q^2}{2C_1} \left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1 \right) < 0$$

2. העבודה החיצונית הדרושה להכנסת דיאלקטרן אל הקבל כאשר הקבל מחובר לסוללה:

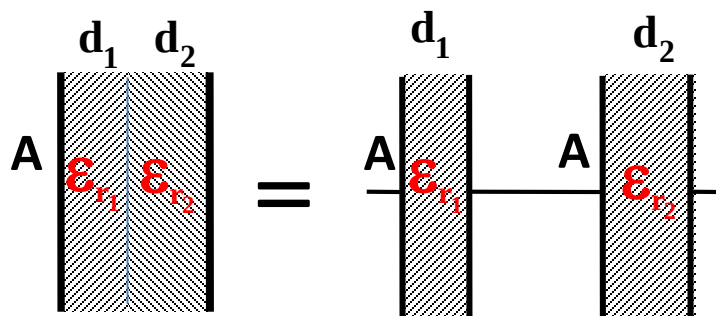
$$W_{\text{external}} = -\frac{1}{2} V_0^2 C_1 (\epsilon_r - 1)$$

בשני המקרים העבודה החיצונית להכנסת דיאלקטרן אל תוך קבל היא שלילית ולשליפת דיאלקטרן-חיובית.

לעתים נראה בתוך קבל יחיד-מספר דיאלקטרנים המונחים זה לצד זה בתצורות (קונפיגורציות) שונות. נערוך היכרות עם שתי תצורות נפוצות :

1. דיאלקטרנים בטור:

ניתן להפריד קבל המכיל שני דיאלקטרנים בטור לשני קבלים טוריים :



2. דיאלקטרנים במקביל:

ניתן להפריד קבל המכיל שני דיאלקטרנים במקביל לשני קבלים מקביליים.

