

## РГЗ «Расчет силовых характеристик электростатического пинцета»

### *Общие сведения о конденсаторах*

Конденсаторы – это электрические приборы для накопления электрических зарядов. Основной характеристикой конденсатора является его емкость, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора определяется отношением его заряда  $q$  к разности потенциалов (напряжению)  $U$  на пластинах

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Удельная емкость характеризуется отношением емкости к объему диэлектрика.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / l, \quad (2)$$

где  $S$  - площадь его пластин,  $l$  - расстояние между пластинами,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость (относительная) среды, заполняющей конденсатор,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная.

Емкость батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных параллельно,

$$C = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (3)$$

Емкость батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных последовательно,

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (4)$$

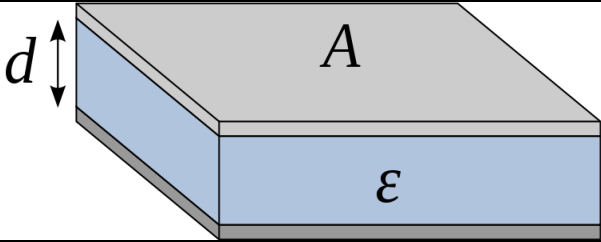
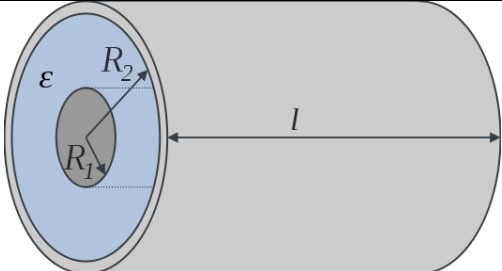
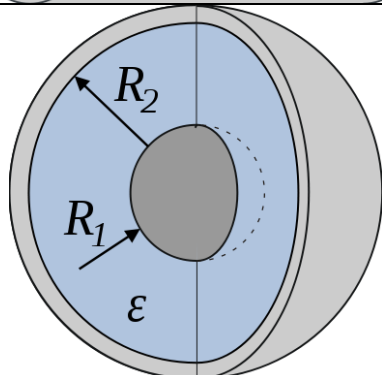
Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (5)$$

Существует множество видов конденсаторов. По виду диэлектрика: воздушные, полимерные, слюдяные, керамические, электролитические и др.

По величине емкости: постоянные, переменные. По форме обкладок: плоские, сферические, цилиндрические, табл. 1.

Таблица 1. Виды конденсаторов по форме обкладок

название	Емкость	Схема
Плоский конденсатор	$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$	
Цилиндрический конденсатор	$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln(\frac{R_2}{R_1})}$	
Сферический конденсатор	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r (\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})^{-1}$	

Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора рассчитывается как произведение пондеромоторного давления  $p$ , создаваемого электростатическими силами, на площадь обкладки конденсатора  $S$ :

$$F = pS, \quad (6)$$

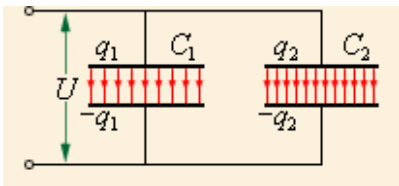
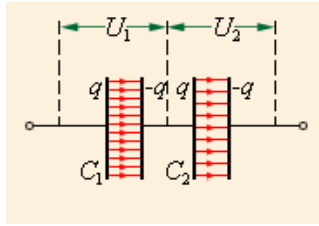
где

$$p = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2, \quad (7)$$

а  $E$  - напряженность электрического поля в конденсаторе.

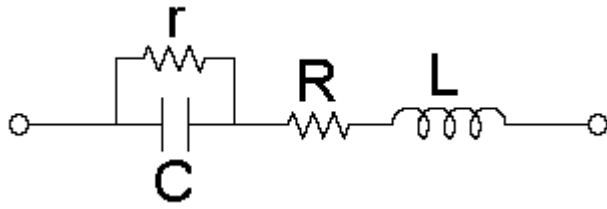
Конденсаторы соединяются двумя способами: параллельно и последовательно, табл.2

Таблица 2. Виды соединения конденсаторов

Соединение	Параллельное	Последовательное
Схема		
Сохраняющаяся величина	$U=U_1=U_2=\dots=U_n=const$	$Q=Q_1=Q_2=\dots=Q_n=const$
Суммарная величина	$Q=Q_1+Q_2+\dots+Q_n$	$U=U_1+U_2+\dots+U_n$
Результирующая ёмкость	$C = \sum_{i=1}^n C_i$	$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$
Сопротивление $R$	$R=R_1+R_2+\dots+R_n$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

Реальные конденсаторы, помимо ёмкости, обладают также собственными сопротивлением и индуктивностью. С высокой степенью точности, эквивалентную схему реального конденсатора можно представить следующим образом, табл 3:

Таблица 3. Эквивалентная схема конденсатора

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>C</math> — собственная ёмкость конденсатора;</li> <li>▪ <math>r</math> — сопротивление изоляции конденсатора;</li> <li>▪ <math>R</math> — эквивалентное последовательное сопротивление;</li> <li>▪ <math>L</math> — эквивалентная последовательная индуктивность.</li> </ul>
---	---

## *Применение конденсаторов*

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники.

Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.

При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах с оптической накачкой, и т. п.

Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.

В промышленной электротехнике конденсаторы используются для компенсации реактивной мощности и в фильтрах высших гармоник.

Конденсаторы способны накапливать большой заряд и создавать большую напряжённость поля, которая используется для различных целей, например, для ускорения заряженных частиц или для создания кратковременных мощных электрических разрядов.

Применяются конденсаторы также в измерительных преобразователях малых перемещений: малое изменение расстояния между обкладками очень заметно сказывается на ёмкости конденсатора при исходном малом зазоре между обкладками.

С помощью емкостных структур возможно измерение влажности воздуха, древесины и других материалов (изменение состава диэлектрика приводит к изменению ёмкости).

Используются конденсаторы и для реализации логики работы некоторых электрических защит, как акусто-электрические, электромеханические и другие преобразователи, имеют и другие применения.

В предлагаемом расчетно-графическом задании рассматривается один из вариантов использования силового (пандеромоторного) действия электрического поля в конденсаторной структуре на примере электростатического пинцета, рис.1. Данное устройство позволяет манипулировать (захватывать и перемещать в новое положение) плоскими, тонкими, легкими (обычно не более нескольких грамм) объектами, в том числе, из немагнитных материалов. Примером таких объектов могут быть полупроводниковые чипы – пластинки кремния размером примерно 5x5x0,1 мм. Для их транспортировки обычно используют липкие ленты и вакуумные присосы, т.к. захватить их обычным механическим пинцетом невозможно из-за их малой толщины и хрупкости. Оба эти варианта приводят к большому проценту брака и загрязнению, недопустимому в микроэлектронном производстве. Использование электростатического пинцета позволяет избежать этого. При касании детали 8, которую надо переместить, внешней частью пинцета 5, при ключе 7, включенном в положение 1, фактически эта деталь совместно с «тянущим» электродом 3 образует плоский двухслойный конденсатор: один слой – воздушный зазор 1, а второй – последовательно соединенный слой 2 из защитного диэлектрика. Таким образом, на деталь 8 будет действовать сила, которую можно рассчитать по формулам (6) и (7), причем под напряженностью поля в данном случае следует понимать напряженность поля  $E_1$ , рис.1. Если эта сила превышает силу тяжести, действующую на деталь, то деталь может быть перенесена в нужное положение (например, на следующую технологическую операцию). Чтобы отсоединить деталь, необходимо разрядить образовавшийся конденсатор, для чего ключ 7 надо перевести в положение 2

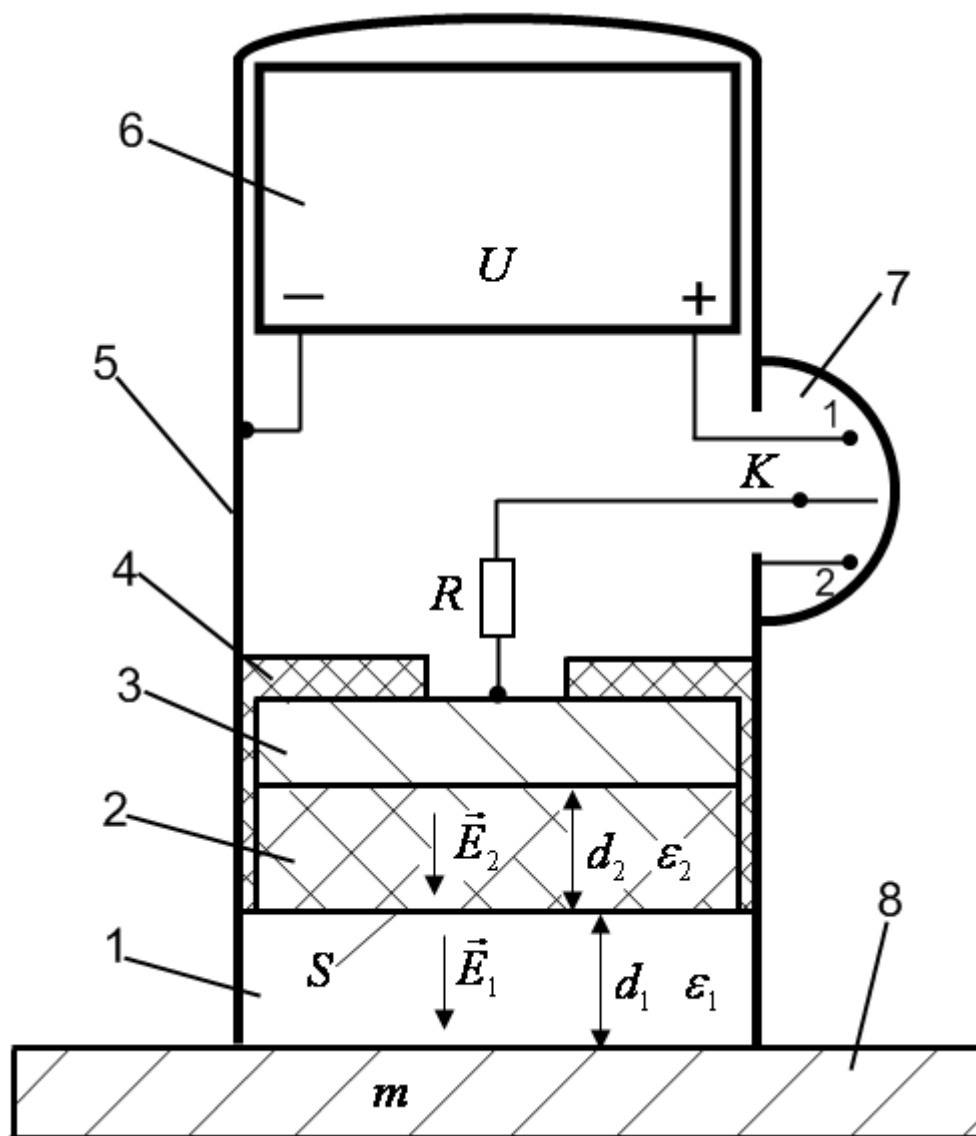


Рис.1. Схематическое (не в масштабе) изображение электростатического пинцета.

1 – воздушный зазор толщиной  $d_1$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1 \approx 1$  и напряженностью электрического поля  $E_1$  в нем; 2 – диэлектрическое защитное покрытие толщиной  $d_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$  и напряженностью электрического поля  $E_2$  в нем; 3 – электрод с «тянущей» площадью  $S$ ; изолятор; 5 - металлический корпус – трубка; 6 – малогабаритный высоковольтный источник питания напряжением  $U$  (конденсатор большой емкости, имеющий малые токи утечки); 7 – переключатель  $K$  режимов работы; 8 – поднимаемая электропроводящая (полупроводящая) плоская деталь массой  $m$ ;  $R \approx 1 \text{ М}\Omega$  высокоомный резистор, предназначенный для ограничения тока до безопасных значений (в положении 1 ключа  $K$ ), а также для ограничения тока разрядки (в положении 2 ключа  $K$ ).

### ***Задание и указания по его выполнению***

1. Пояснить принцип работы конденсаторов, указать их отличительные особенности. Представить краткие теоретические сведения о физических процессах, происходящих при поляризации диэлектриков, дать определения и указать размерности соответствующих физических величин, Пояснить физические основы работы электростатического пинцета, используя необходимые рисунки.

2. Вывести формулу (7) для пондеромоторного давления.

3. Вывести выражение для напряженности электрического поля в воздушном зазоре 1 электростатического пинцета. Результат свести к виду:

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2 U}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}. \quad (8)$$

4. Выбрать значение рабочего напряжения  $U$  близким, но не превышающим предельно допустимого значения, исходя из того, что падение напряжения на воздушном зазоре 1 должно быть не более 327 В:

$$U_1 = E_1 d_1 \leq 327 \text{ В}. \quad (9)$$

Это значение связано с возможностью электрического пробоя воздушного зазора. Как следует из кривой Пашена, имеющей минимум, минимальное значение напряжения, при котором возникает пробой воздуха при нормальном атмосферном давлении, происходит при напряжении 327 В и расстоянии между электродами 7,5 мкм. Поскольку близкие к этому значения толщины воздушного зазора  $d_1$  используются в электростатическом пинцете, используемое напряжение питания  $U$  следует ограничить в соответствии с указанным алгоритмом. Данные для расчета представлены в табл. 4.

5. Рассчитать максимальную массу  $m$  детали 8, рис.1, которую можно поднять электростатическим пинцетом, в соответствии с заданным номером варианта.

6. Построить графическую зависимость, указанную в соответствии с заданным номером варианта.

7. Сделать выводы по результатам расчетов.

Таблица 4. Варианты заданий

Вариант	$\varepsilon_2$	$d_{1, \text{мкм}}$	$d_{2, \text{мкм}}$	$S, \text{мкм}^2$	график
1	2,4	1	12	19	$m(d_1)$
2	2,1	2	12	19	$m(d_2)$
3	3,0	3	12	19	$m(\varepsilon_2)$
4	3,5	4	12	19	$m(S)$
5	2,4	5	12	19	$m(U)$
6	2,1	6	12	27	$E_1(d_1)$
7	3,0	7	12	27	$E_1(d_2)$
8	3,5	8	8	27	$E_1(\varepsilon_2)$
9	2,4	9	8	27	$E_1(S)$
10	2,1	10	8	27	$E_1(U)$
11	3,0	11	8	32	$p(d_1)$
12	3,5	12	8	32	$p(d_2)$
13	2,4	13	8	32	$p(\varepsilon_2)$
14	2,1	14	8	32	$p(S)$
15	3,0	15	8	32	$p(U)$
16	2,1	16	8	45	$m(\varepsilon_2)$
17	2,4	17	8	45	$m(S)$
18	3,0	18	4	45	$m(U)$
19	3,5	19	4	45	$E_1(\varepsilon_2)$
20	2,4	20	4	45	$E_1(S)$
21	2,1	21	4	88	$E_1(U)$
22	3,0	22	4	88	$p(d_2)$
23	3,5	23	4	88	$p(\varepsilon_2)$
24	3,6	24	4	88	$p(S)$
25	2,1	25	4	88	$p(U)$
26	2,1	14	8	32	$m(d_1)$
27	3,0	15	8	32	$m(d_2)$
28	2,1	16	8	45	$m(\varepsilon_2)$
29	2,4	17	8	45	$m(S)$
30	3,0	18	4	45	$m(U)$