

Электростатика в технологических процессах электроники

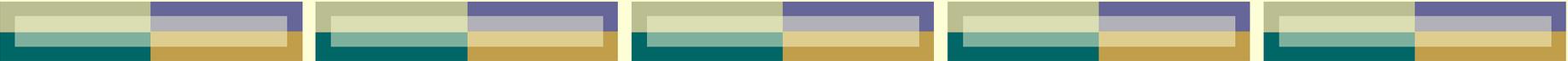


Военная академия связи
им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

Пшелко
Николай Сергеевич
д.т.н., профессор кафедры
физики

моб. +7-911-9973863 e-mail: nikolsp@mail.ru

Санкт-Петербург
2021



Рассматриваемые вопросы

Введение

1. Использование силового действия электрического поля для необратимого «склеивания» материалов: теория и практическое применение
2. Повышение адгезии наносимых на подложки пленок и управление их характеристиками с помощью электрического поля
3. Применение силового действия электрического поля для обратимого соединения материалов в крепежных устройствах, в том числе, для манипулирования плоскими немагнитными и перфорированными изделиями
4. Измерения электрофизических характеристик материалов и структур в электрических полях: информативность измерений, электрические схемы и программы
5. Особенности электрических полей при использовании микро- и наноразмерных межэлектродных промежутков

Заключение

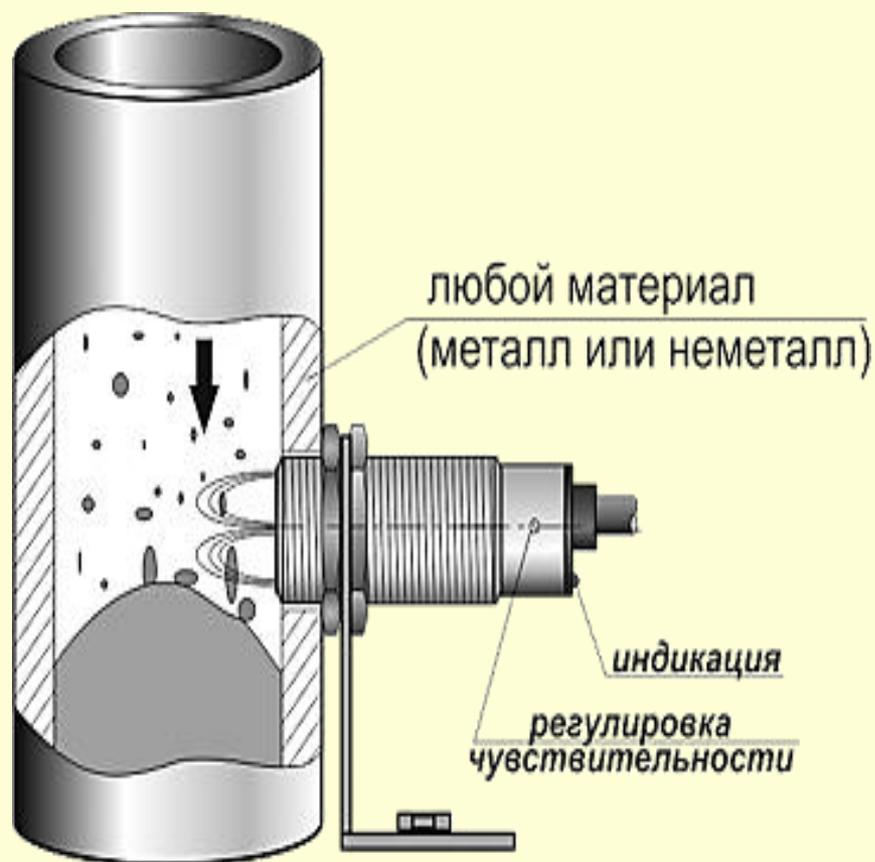


Введение

Примеры использования электрического поля

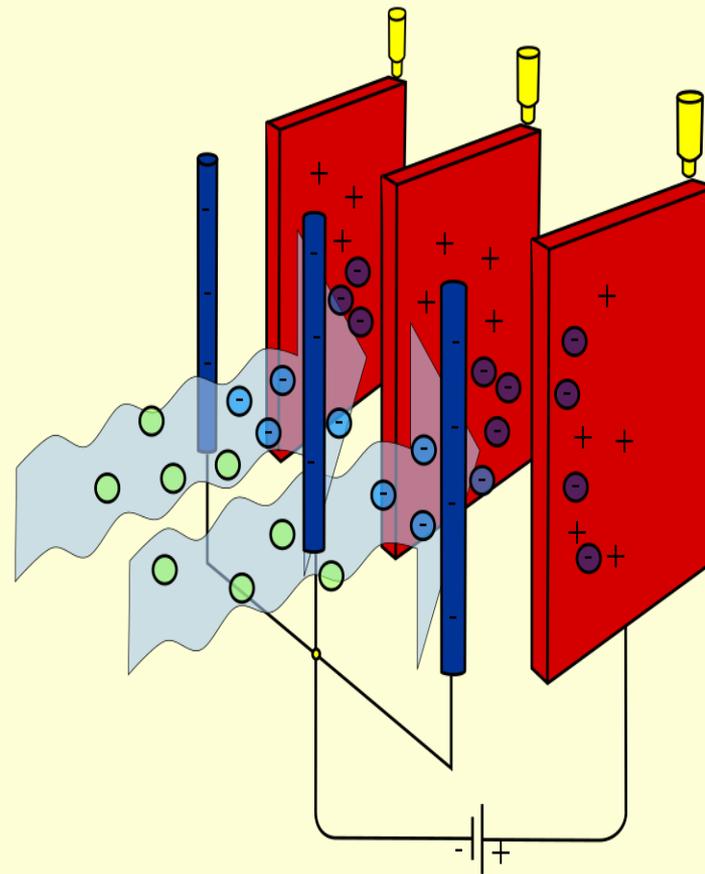
Емкостные датчики

Емкостные датчики применяются в управлении технологическими процессами и системах регулировки в промышленных производствах. Сегодня наиболее популярными датчиками стали датчики присутствия, которые являются надежными конструкциями. Они имеют невысокую цену, и широкий спектр направлений по использованию.



Электростатические фильтры

Загрязнённый воздух подаётся в пространство между пластинами, пыль из проходящего через фильтр загрязнённого воздуха приобретает электрический заряд (ионизируется) под воздействием ионного тока, после чего под действием электрического поля притягивается к пластинам и оседает на них.



Использование электрических явлений для сепарации частиц в сыпучих средах

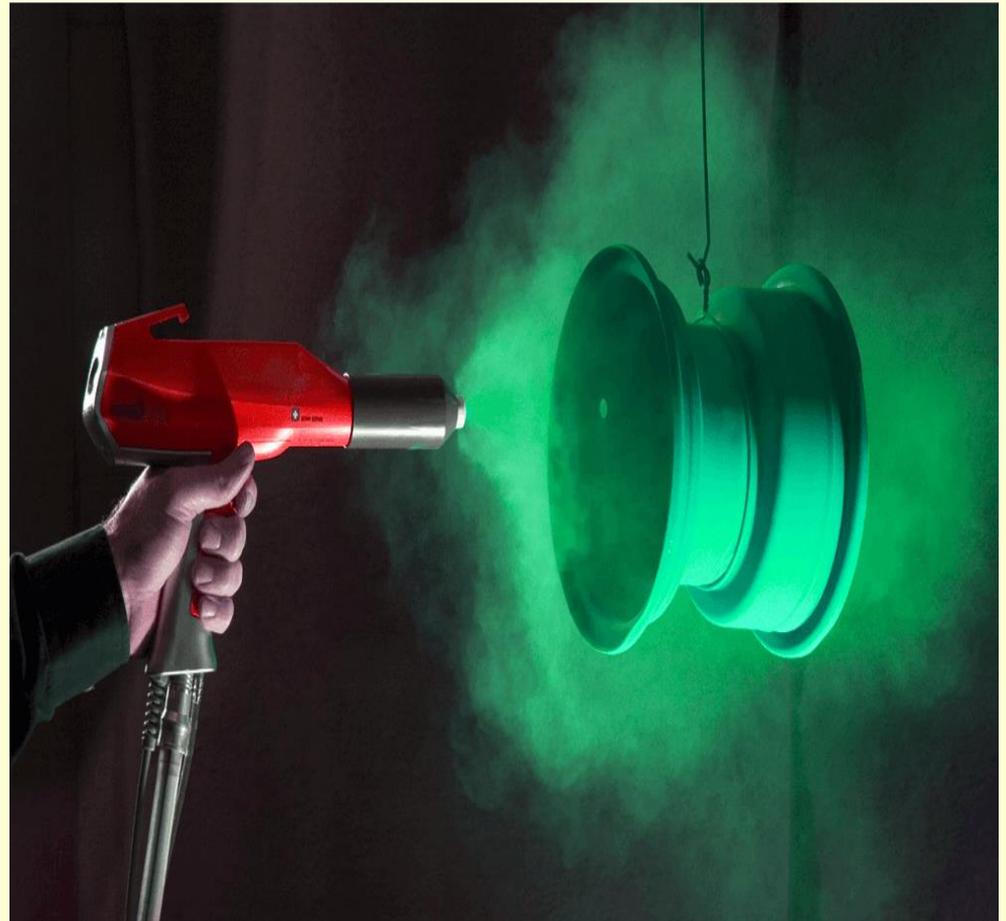
*Патент на способ
сепарации измельченной
горной породы при
помощи электрического
поля*

Авторы Н.Пщелко и др.



Электроаэрозольная обработка

Действие электрических сил увеличивает количество материала, осевшего на объект, повышает равномерность его осаждения, способствует лучшему удержанию осевших частиц на поверхности объекта. Все это дает возможность достигнуть того же технологического эффекта при существенно меньшем расходе материала, чем при использовании незаряженного аэрозоля.



Использование в медицине

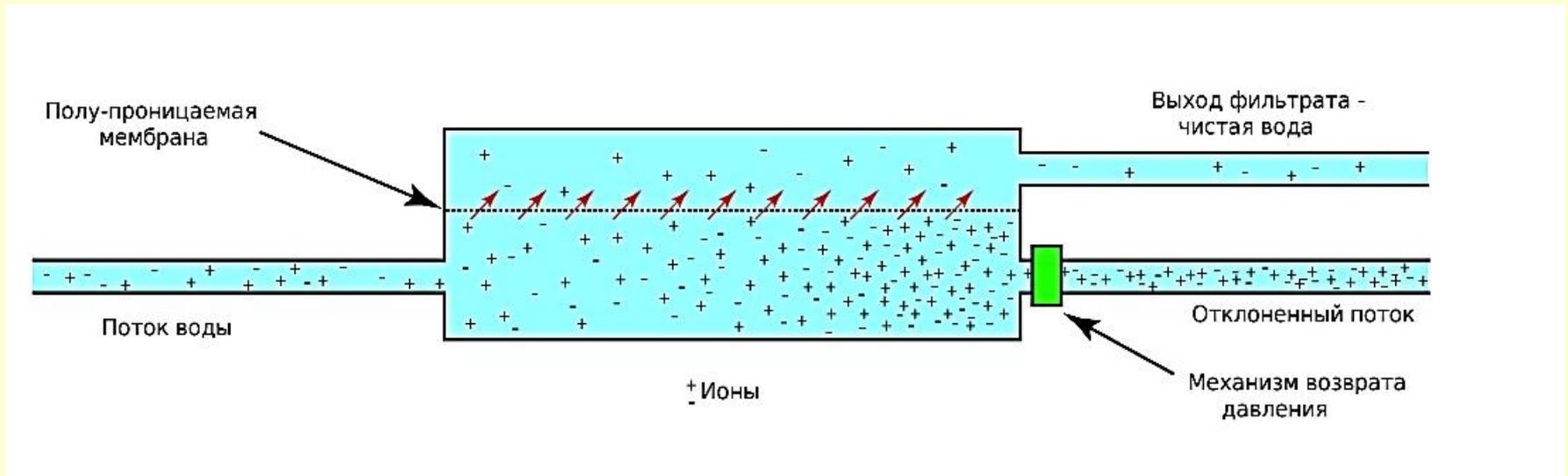


Электростатический массаж - лечебно-профилактическое применение импульсных электрических полей высокой напряженности. Действующим фактором в этом методе является пульсирующее электростатическое поле, которое возникает между руками врача и пациентом. При проведении процедур один электрод размещается на предплечье врача, а другой фиксируют на теле больного вдали от области воздействия. Врач руками, одетыми в перчатки из ткани-диэлектрика, совершает движения по правилам массажа над пораженным участком больного.

Медицинские пластины, покрытые электретом для фиксации сломанных костей

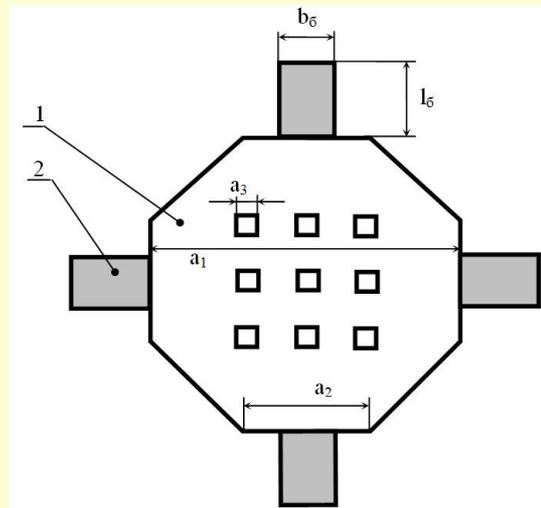
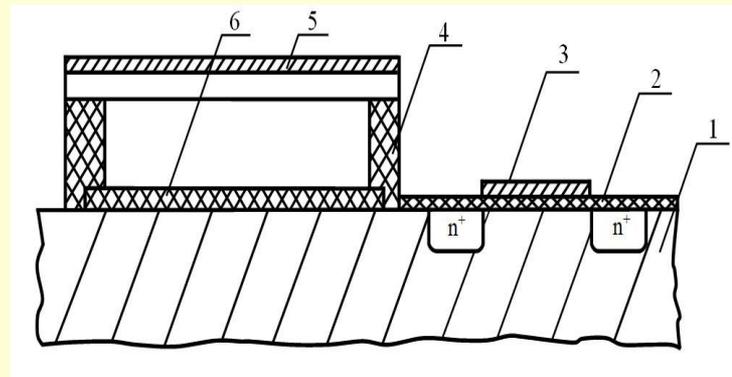
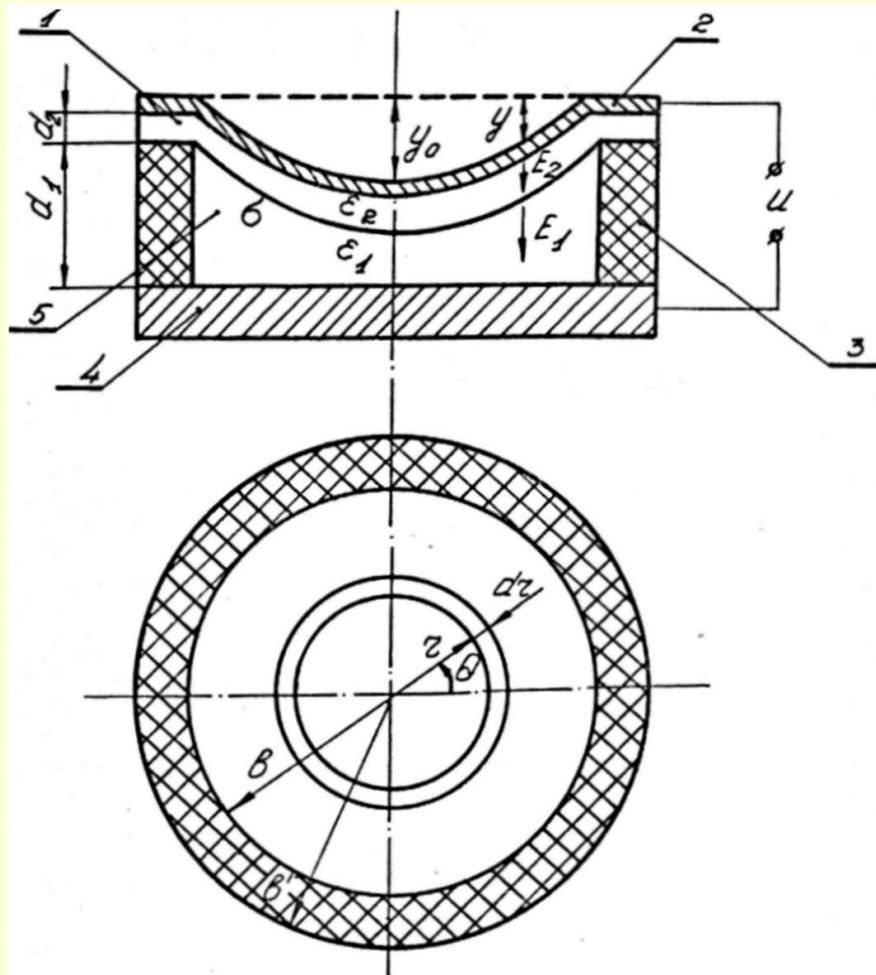


Применение в химии

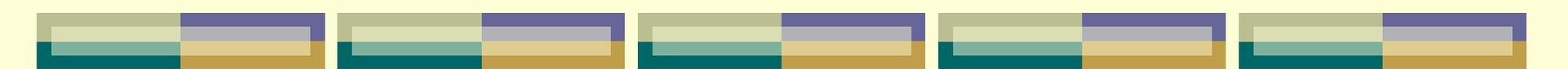


Данная сфера науки предусматривает использования различных чистых или смешанных материалов. В связи с этим работа с эл. полями не могла обойти эту отрасль. Компоненты смесей взаимодействуют с электрическим полем по-разному. В химии это свойство применяется для **разделения жидкостей. Данный метод нашел лабораторное применение, но встречается и в промышленности, хотя и реже. К примеру, при воздействии полем осуществляется отделения в нефти загрязняющих компонентов.**

Электростатика в датчиках и актюаторах



95% выпускаемых в мире микрофонов - электретные

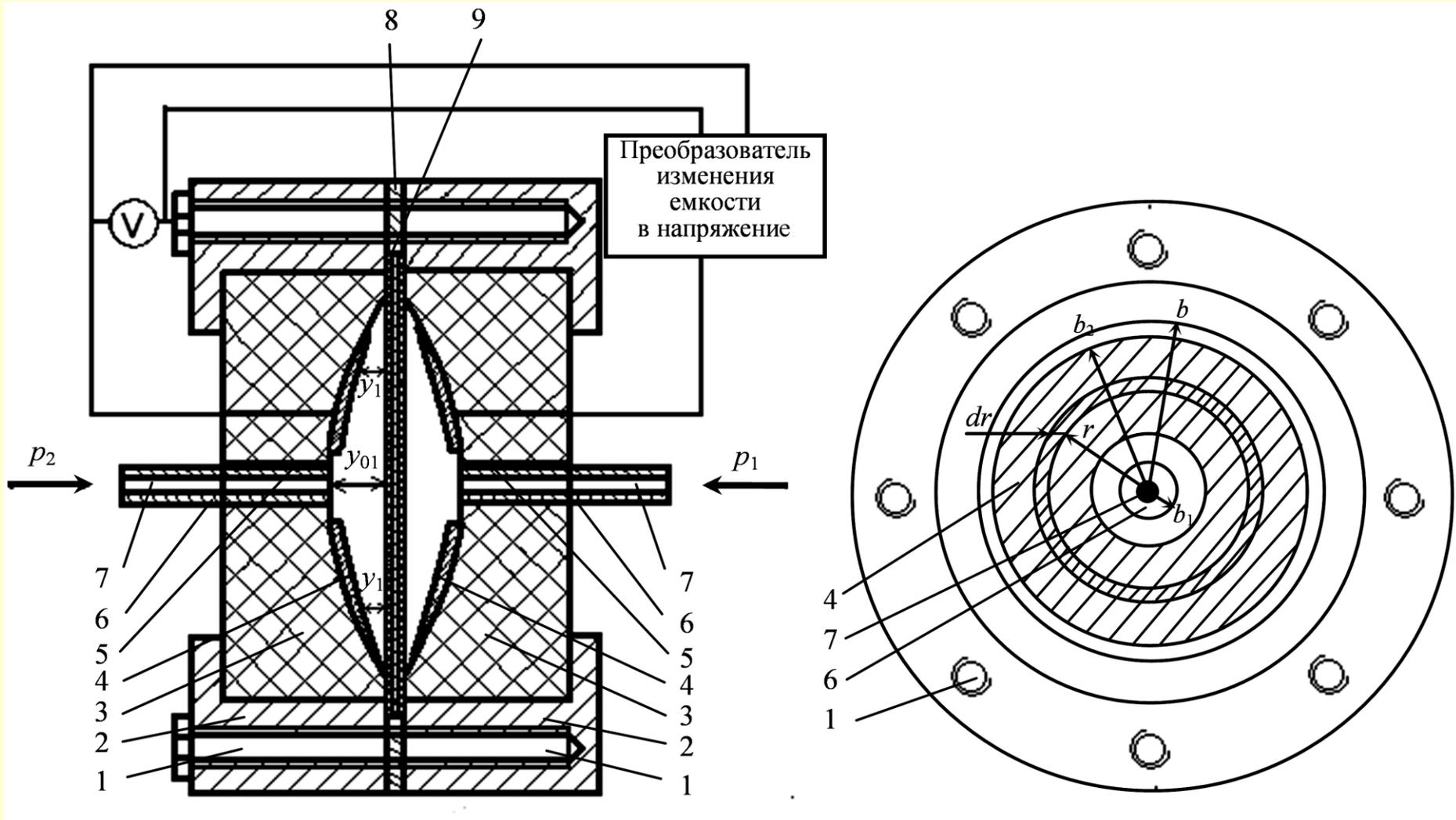


Актюатор – это исполнительное устройство, которое преобразовывает тепловую, электрическую и магнитную энергии в механическое движение. Актюаторные компоненты имеют размеры от нескольких квадратных микрометров до одного квадратного сантиметра.

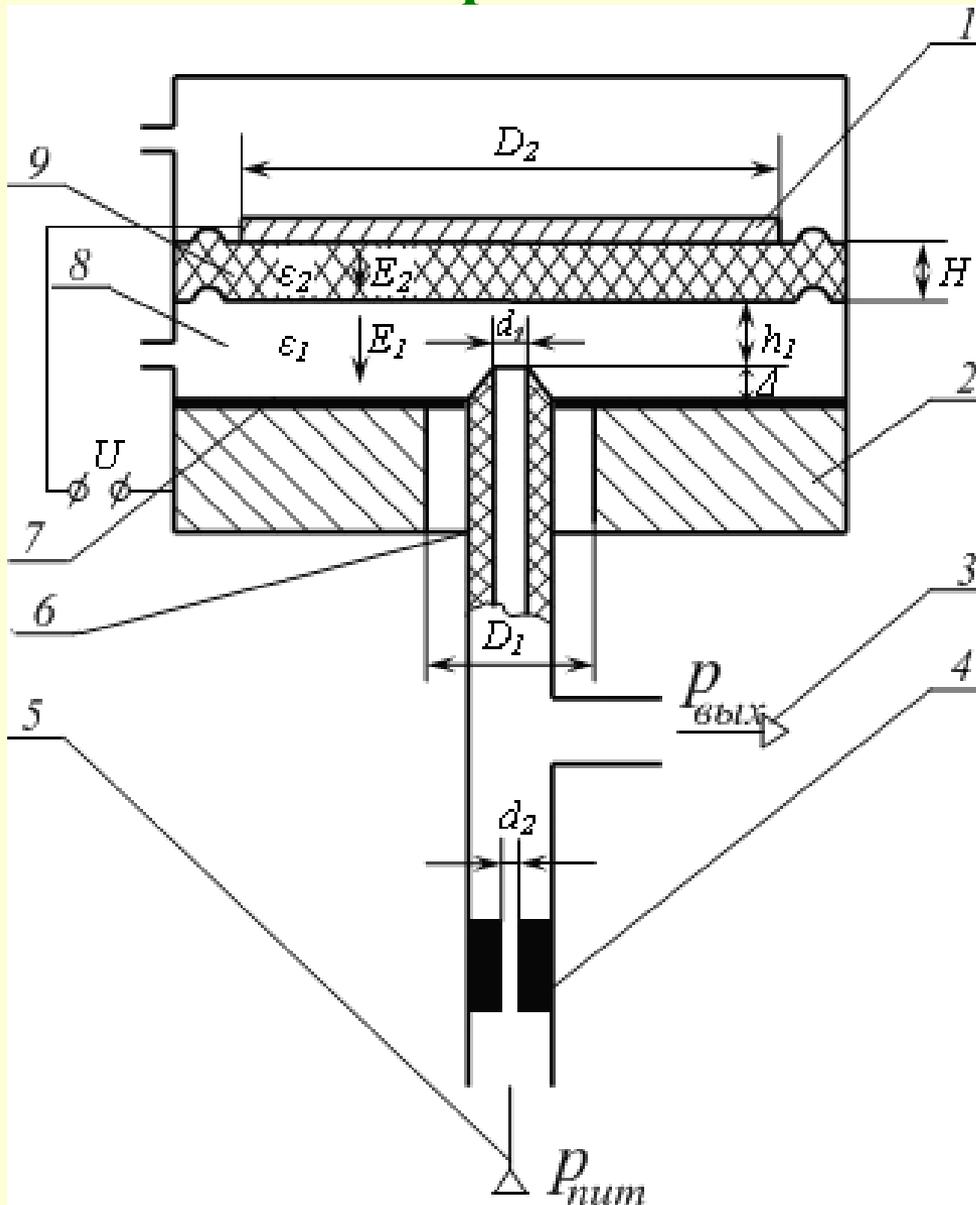
Малые размеры элементов микросистемной техники (МСТ) позволяют эффективно использовать электростатические силы в МСТ даже при небольших напряжениях



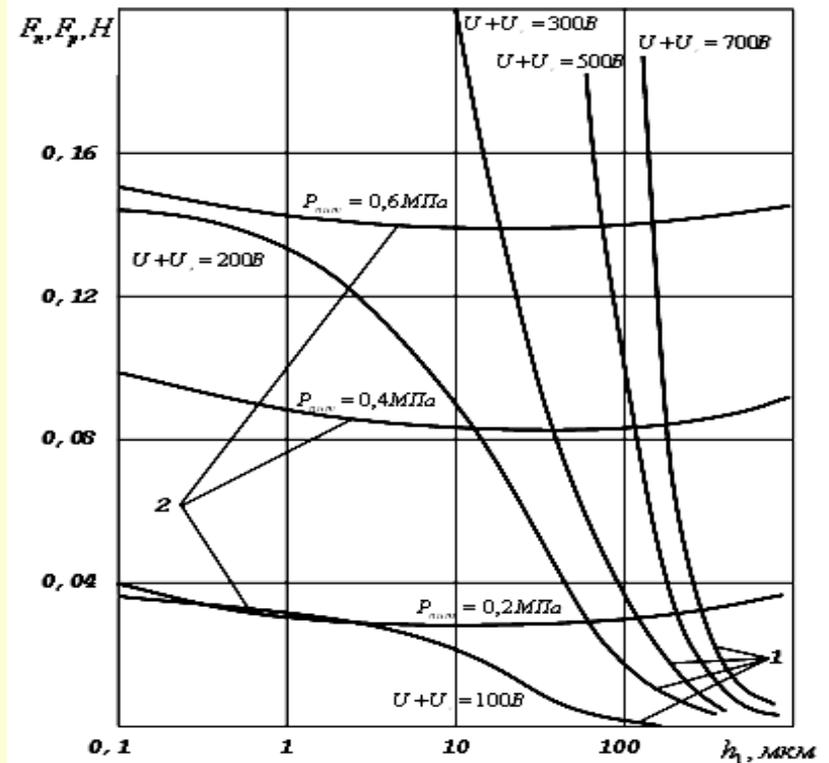
Ёмкостной датчик перепада давлений с силовой электростатической компенсацией

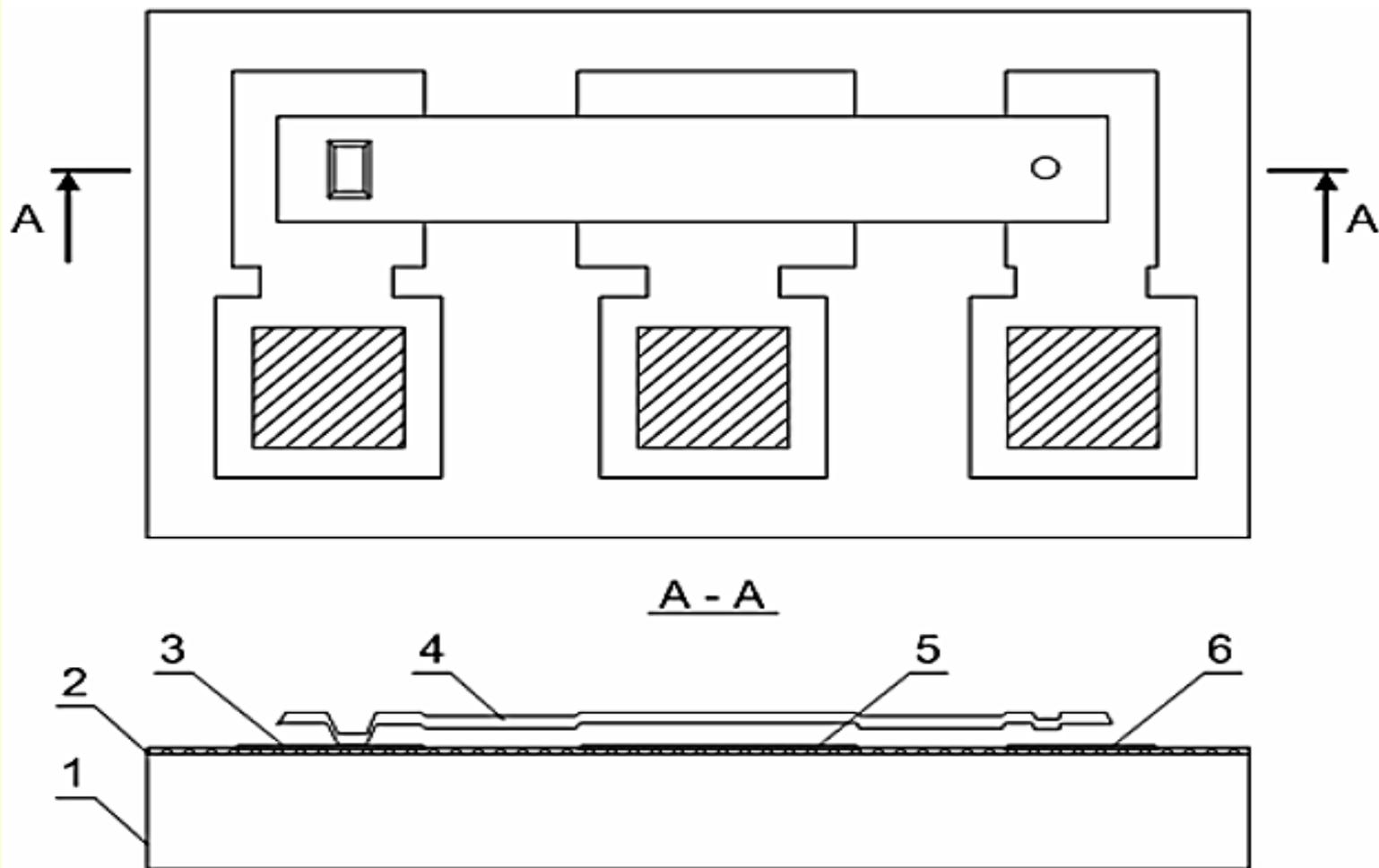


Электропневматический преобразователь



$$\begin{cases} E_1(h_1 + \Delta_1) + E_2 \cdot H + iR_0 = U \\ \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 - \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2 = \sigma \\ i = \frac{U - iR_0}{R_{\text{од}}} + \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{dE_1}{dt} \cdot S \\ m \frac{d^2 h_1}{dt^2} = F_H - F_n + F_{\text{од}} - F_{\text{дйе}} + F_{\text{од}} \end{cases}$$

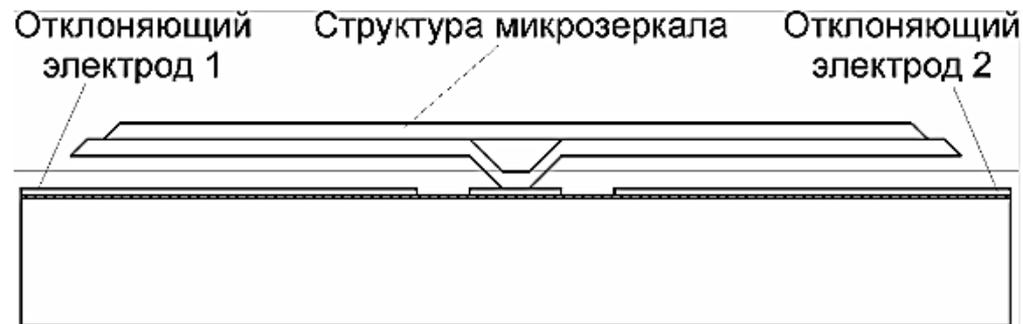




Структура интегрального микромеханического реле:

1 – подложка; 2 – диэлектрик; 3 – область истока;

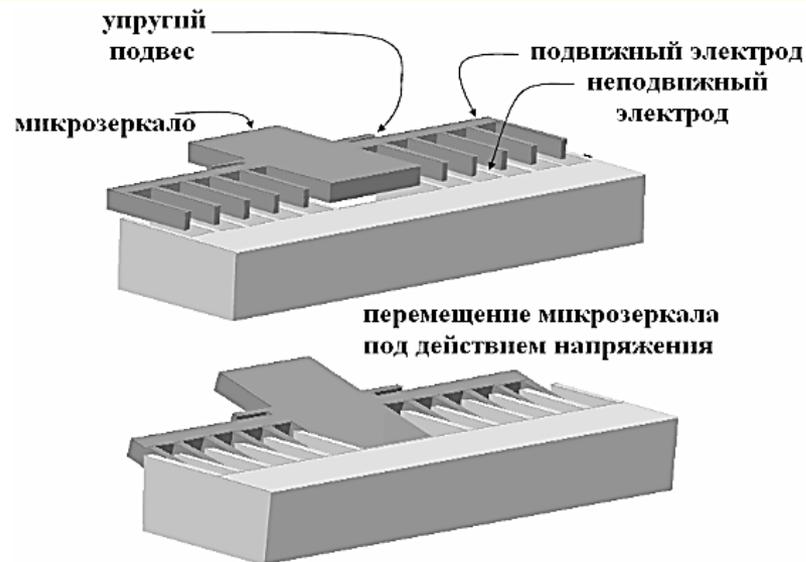
4 – консольная балка; 5 – область затвора; 6 – область стока



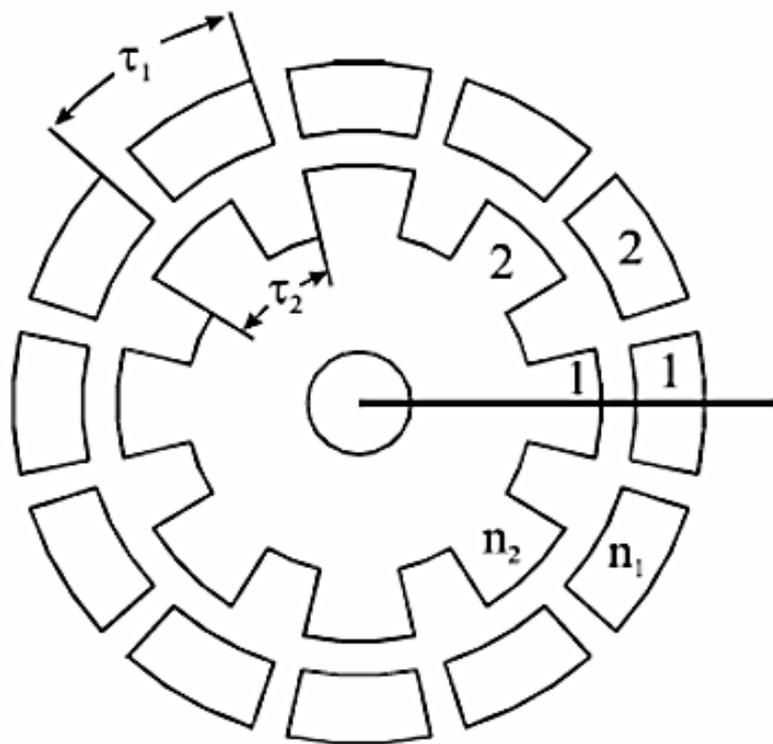
Структура интегрального микрзеркала с электростатической активацией



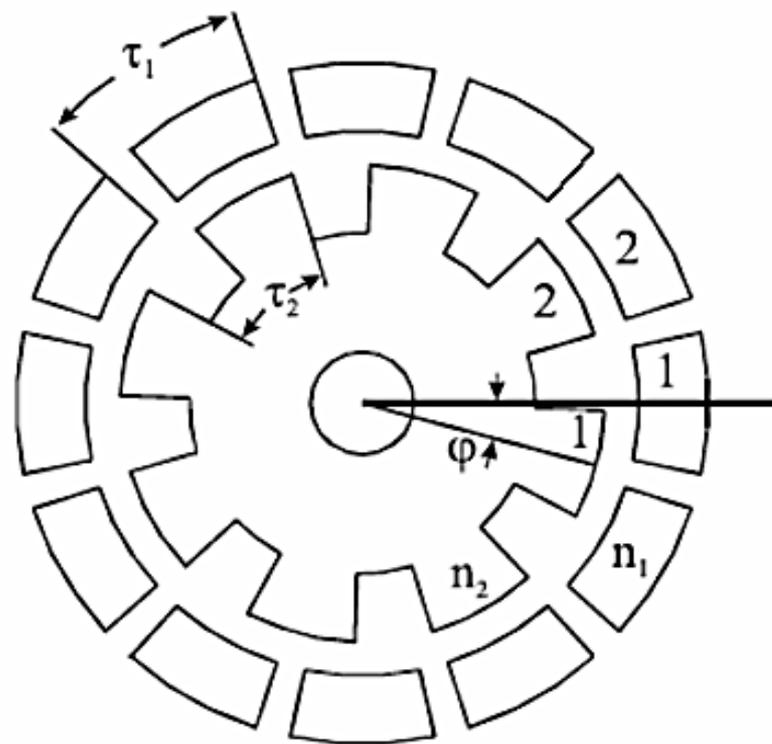
Интегральное дуосное микрзеркало, выполненное по технологии объемной микрообработки



Перемещение интегрального микромеханического зеркала под действием отклоняющего напряжения



а

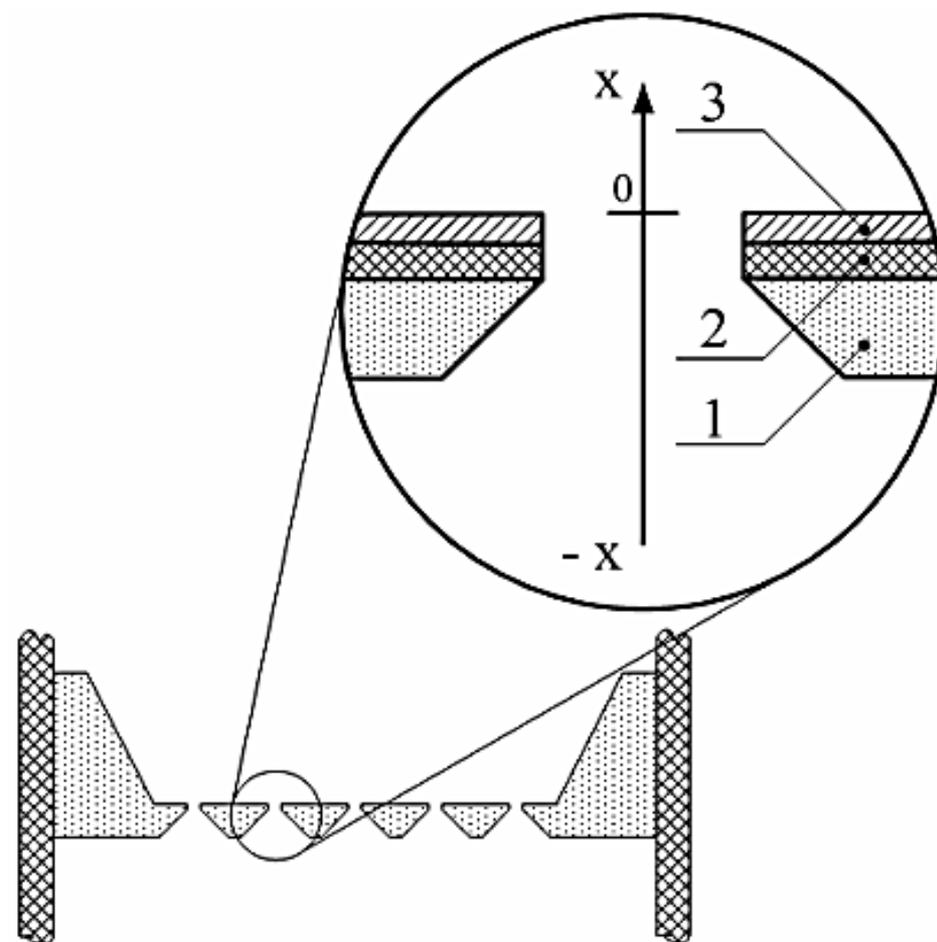


б

Планарный электростатический двигатель:

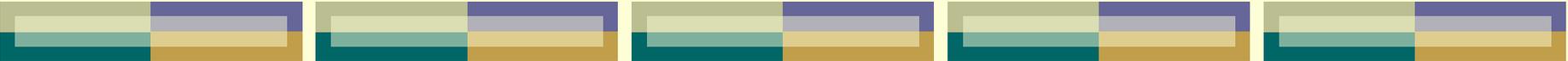
а – начальное положение ротора планарного микродвигателя;

б – перемещение ротора планарного микродвигателя



Структура электростатического микронасоса:

1 – подложка; 2 – диэлектрик; 3 – металлический электрод

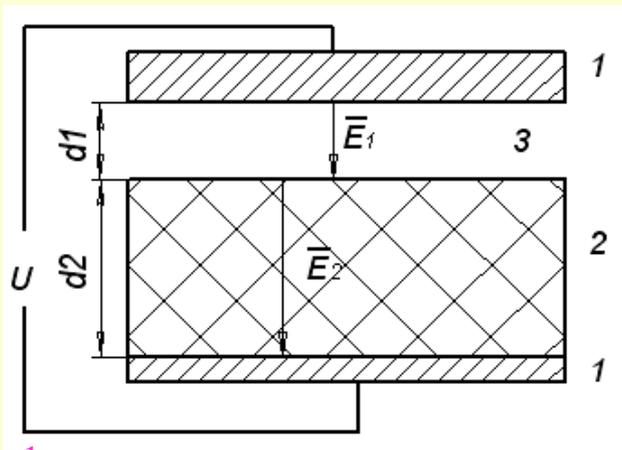


1. Использование силового
действия электрического
поля для необратимого
«склеивания» материалов:
теория и практическое
применение



Электроадгезионные эффекты

Использование электростатических сил наиболее эффективно на малых расстояниях, реализуемых в микросистемной технике – бурно развивающейся области микро- и наноэлектроники – и поэтому исследования в этом направлении являются актуальными.



1 – металл;
2 – диэлектрик
3 – воздушный зазор;

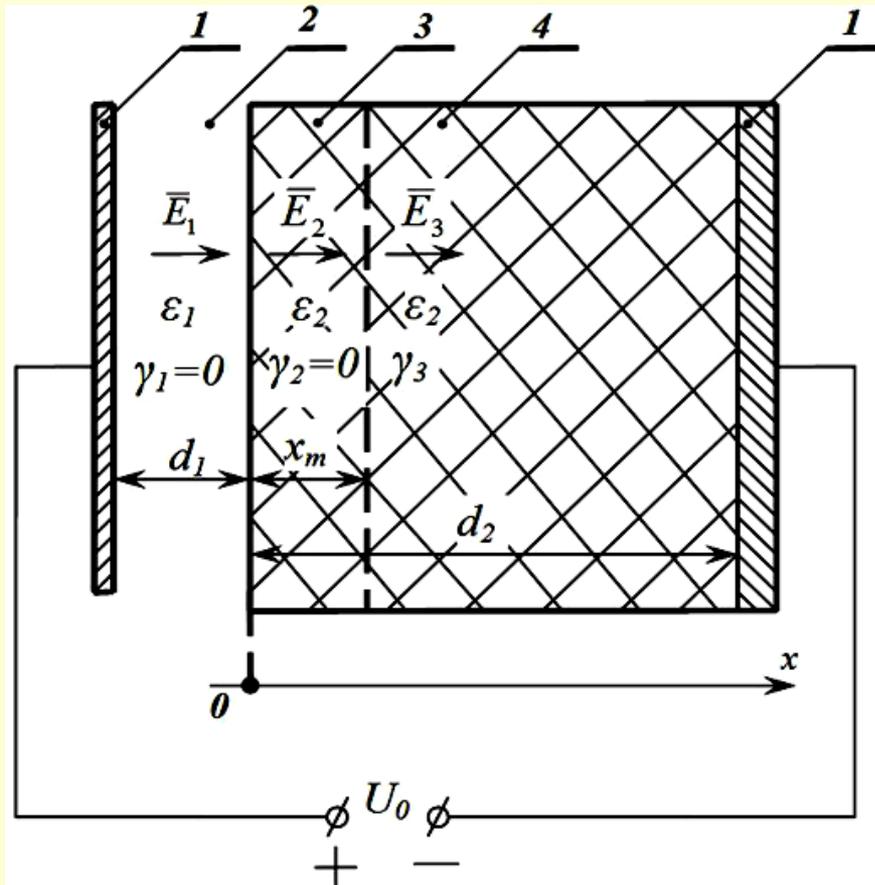
- Между двумя твердыми телами, имеющими различные электрические потенциалы, возникают электростатические (пондеромоторные) силы

- эффект Джонсона-Рабека

$$p_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1^2$$

$$p_k = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2^2$$

Перераспределение электрических полей (ЭП) в диэлектрике под действием постоянного электрического напряжения



$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{dE_1}{dt} + \gamma_1 E_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{dE_3}{dt} + \gamma_3 E_3 \\ \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 - \int_0^x \rho dx' \\ \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_3 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 - \int_0^{x_m} \rho dx \\ U_0 = E_1 d_1 + \int_0^{x_m} E_2 dx + E_3 (d_2 - x_m) \end{array} \right.$$

$$\gamma_1 = \gamma_2 \approx 0$$

$$\tau = \frac{\exp\left(\frac{W}{kT}\right)}{\sqrt{b^2 + 4ac}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{\varepsilon_1 \gamma_3}{2\varepsilon_0 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)} \\ b = \frac{\gamma_3 d_1}{\varepsilon_0 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)} \\ c = \frac{\varepsilon_1 \gamma_3 U_0}{\rho (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)} \end{array} \right.$$

Формирование и неразрушающий контроль электроадгезионных соединений (ЭАС)

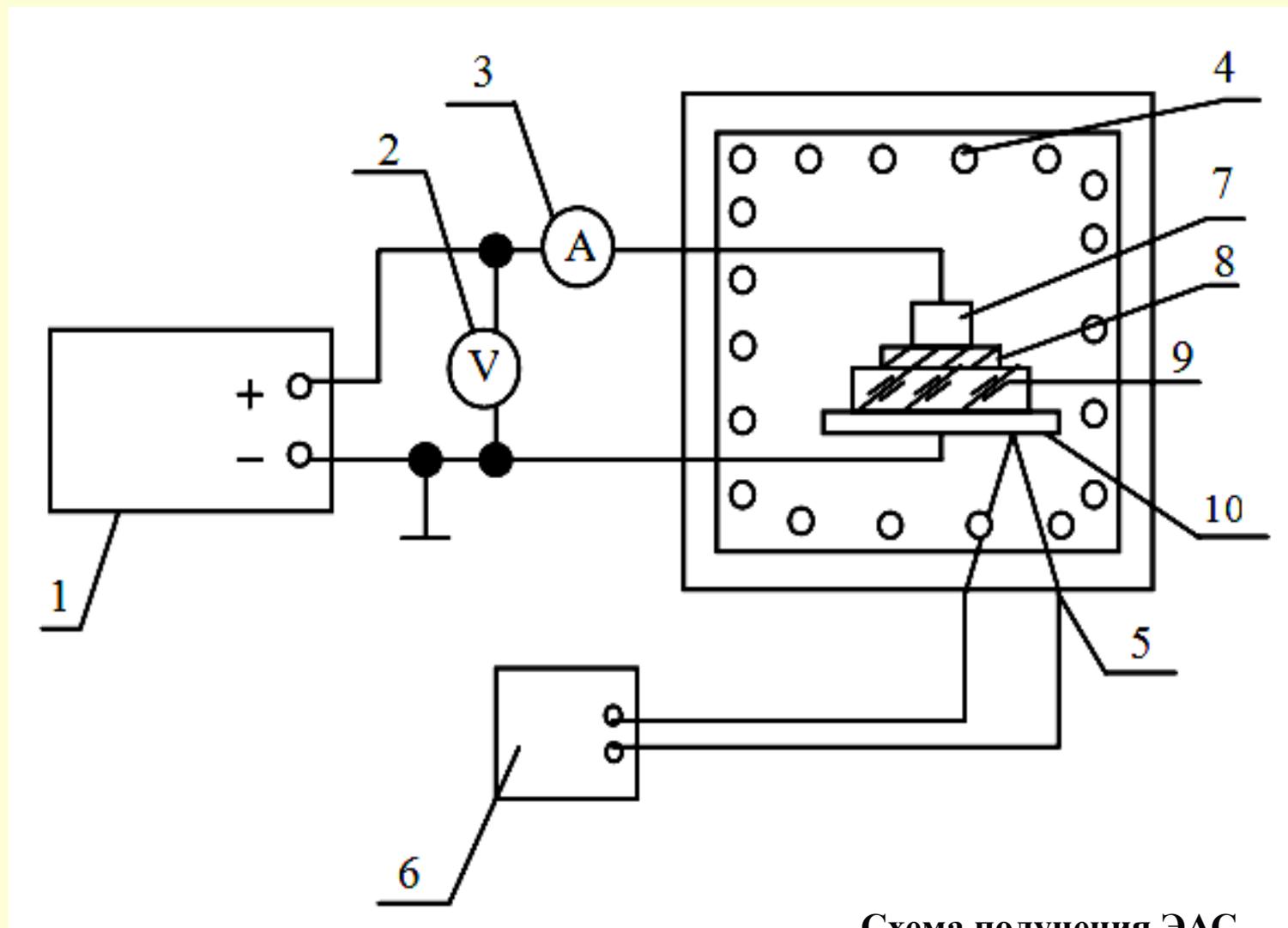
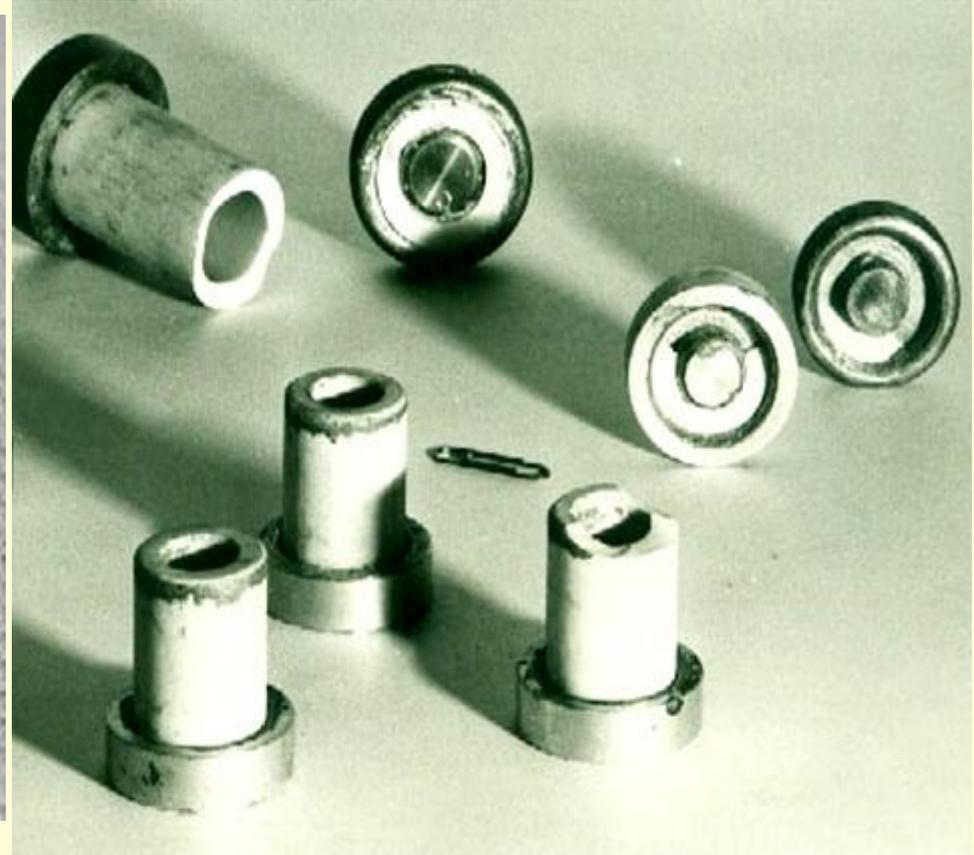
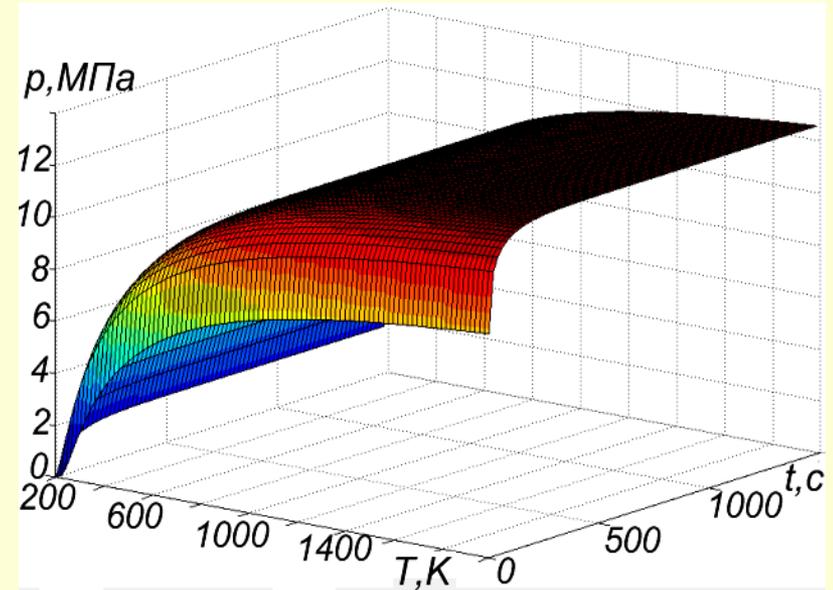
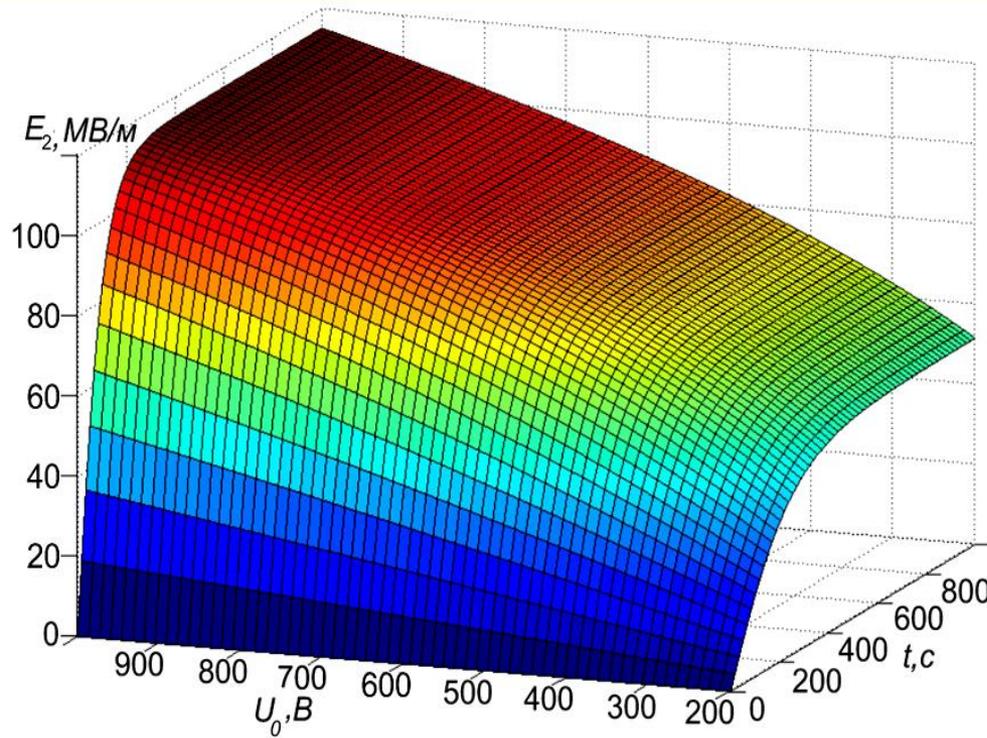


Схема получения ЭАС



Адгезионная прочность ЭАС соизмерима с когезионной прочностью соединяемых материалов

Динамика образования электроадгезионного соединения

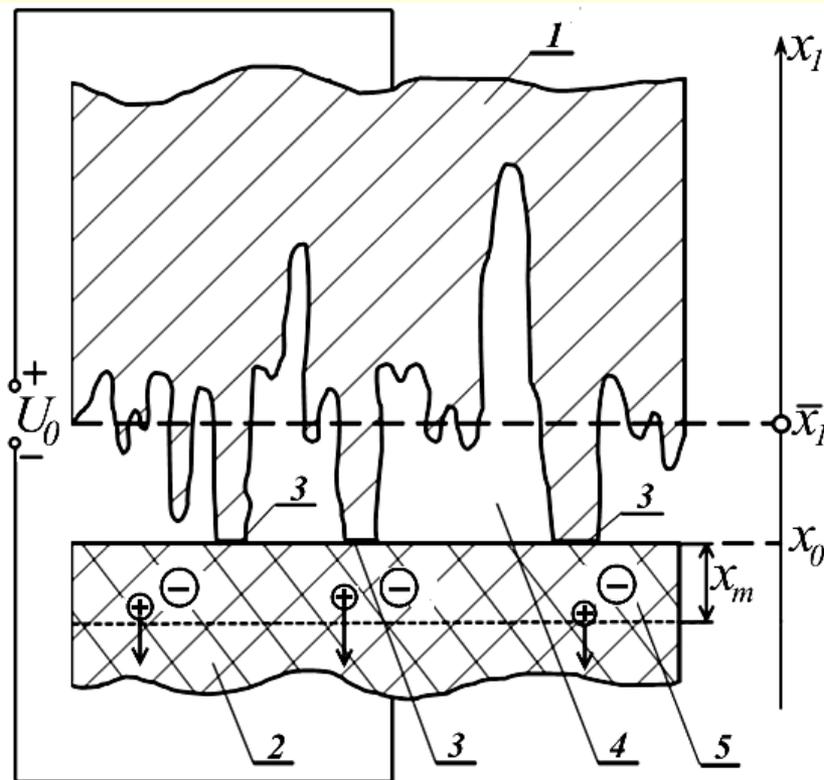


Типичные зависимости напряженности электрического поля в прианодной области диэлектрика и пондеромоторного давления при получении ЭАС

$$x_m(t) = \frac{(\sqrt{b^2 + 4ac} - b) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)}{2a \left(1 - \frac{b - \sqrt{b^2 + 4ac}}{b + \sqrt{b^2 + 4ac}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)}$$

$$E_1(t) = \frac{\varepsilon_2 U_0}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} + \frac{\rho x_m \left(d_2 - \frac{x_m}{2}\right)}{\varepsilon_0 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d)}$$

Модель для неразрушающего контроля прочности ЭАС



$$\frac{dS}{S_0 dx_1} = \frac{1}{D_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \bar{x}_1)^2}{2D_1^2}\right]$$

$$\bar{p} = p_{\phi, \kappa} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tilde{x}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right] d\tau + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\tilde{x}}^{\infty} p_1(\tau) \cdot \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right] d\tau$$

$$\bar{p} = p_{\phi, \kappa} \cdot \frac{S_{\phi, \kappa}}{S_0} + \frac{1}{D_1 \sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} p_1(x_1) \cdot \exp\left[-\frac{(x_1 - \bar{x}_1)^2}{2D_1^2}\right] dx_1$$

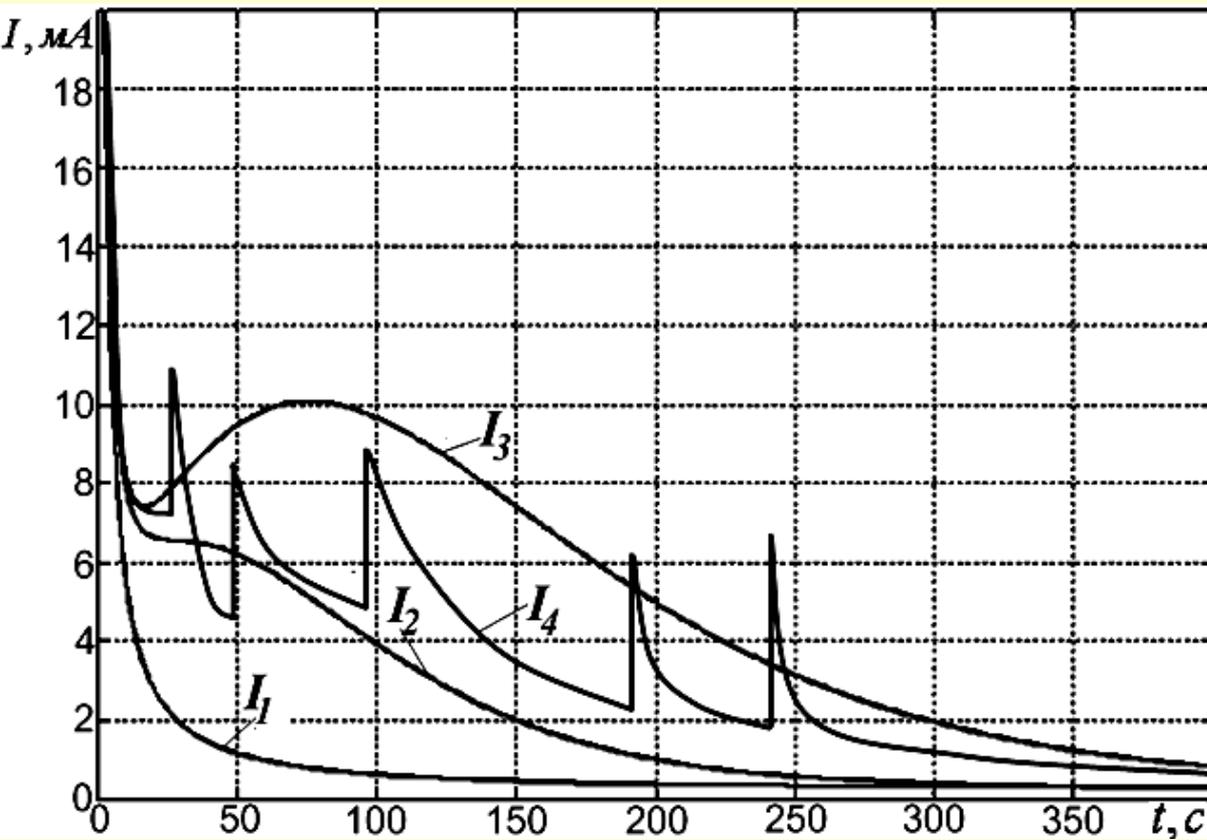
$$\tau = \frac{x_1 - \bar{x}_1}{D_1}$$

$$\tilde{x} = \frac{x_0 - \bar{x}_1}{D_1}$$

$$p_{\phi, \kappa} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tilde{x}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right] d\tau + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\tilde{x}}^{\infty} p_1(\tau) \cdot \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right] d\tau = p_0 \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tilde{x}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{2}\right] d\tau}$$

$$p_1(\tau) = \frac{\rho^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_1} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_2^2 D_1^2 (\tau - \tilde{x})^2}{\varepsilon_1^2} + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_2 U_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\varepsilon_2 D_1 (\tau - \tilde{x})}{\varepsilon_1} \right]^2$$

Механизм протекания тока через ЭАС



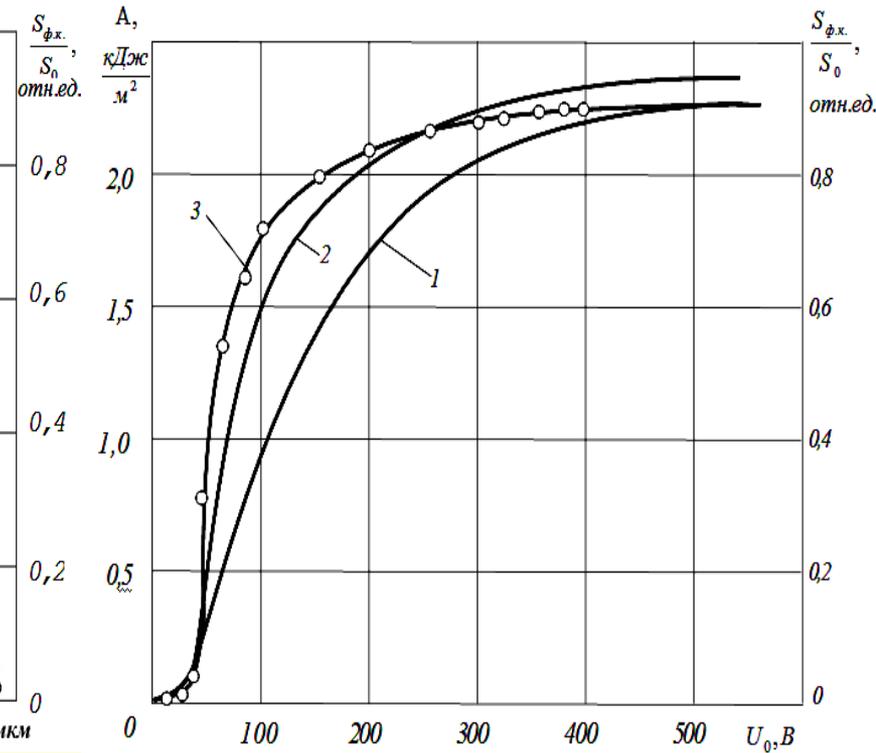
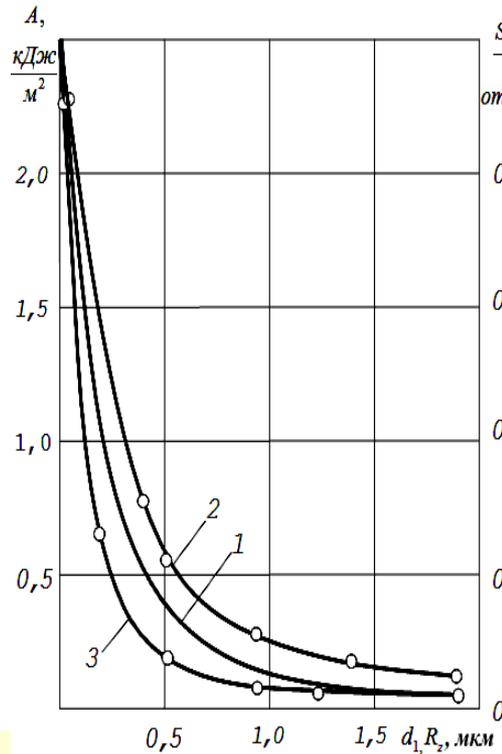
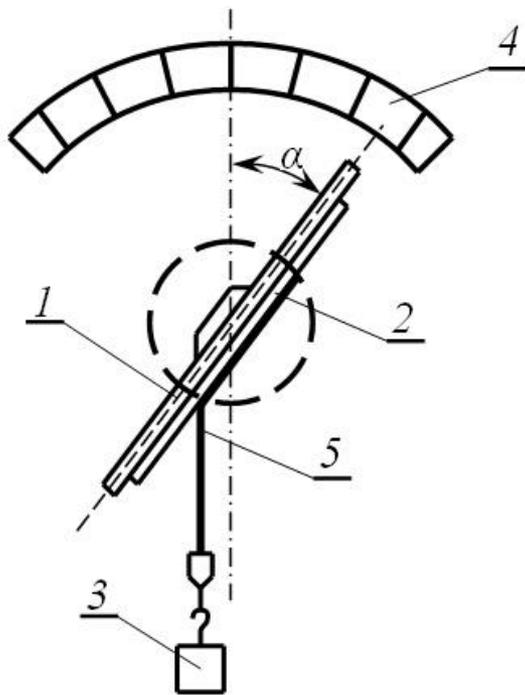
$$\frac{S_{\phi.к}}{S_0} = 1 - \exp\left[-\frac{\bar{p}}{p_0}\right]$$

$$j_1 = \frac{d\sigma}{dt} = \rho \frac{dx_m}{dt}$$

$$I_3 = I_1 + \frac{U_0}{\frac{x_m}{\gamma_{x2} S_{\phi.к}} + R_{д2}}$$

Типичные расчетные зависимости тока от времени при получении ЭАС

Разрушающий контроль прочности ЭАС



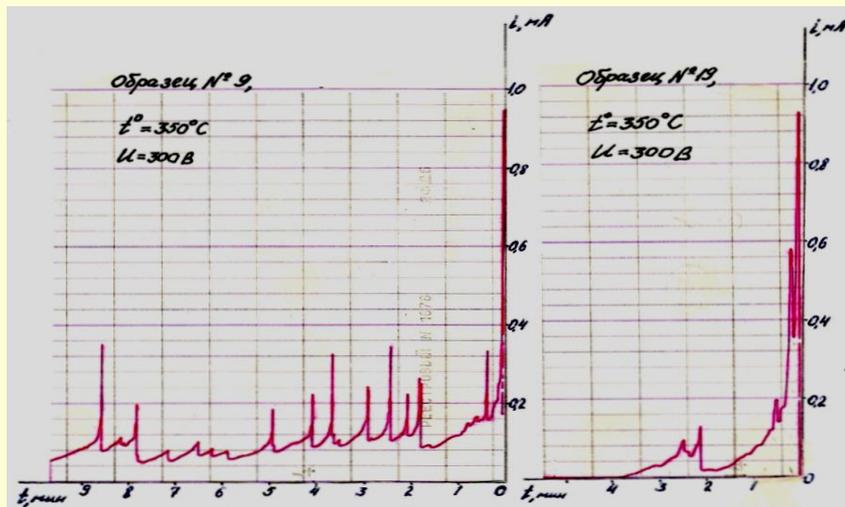
Адгезиометр

$$A = \frac{mg}{b} (1 - \cos \alpha)$$

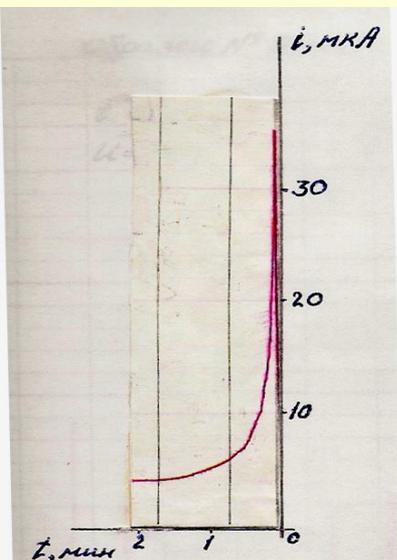
Расчетная (1) и экспериментальные (2,3) зависимости работы от шероховатости поверхностей

Расчетные (1,2) и экспериментальная (3) зависимости работы от напряжения

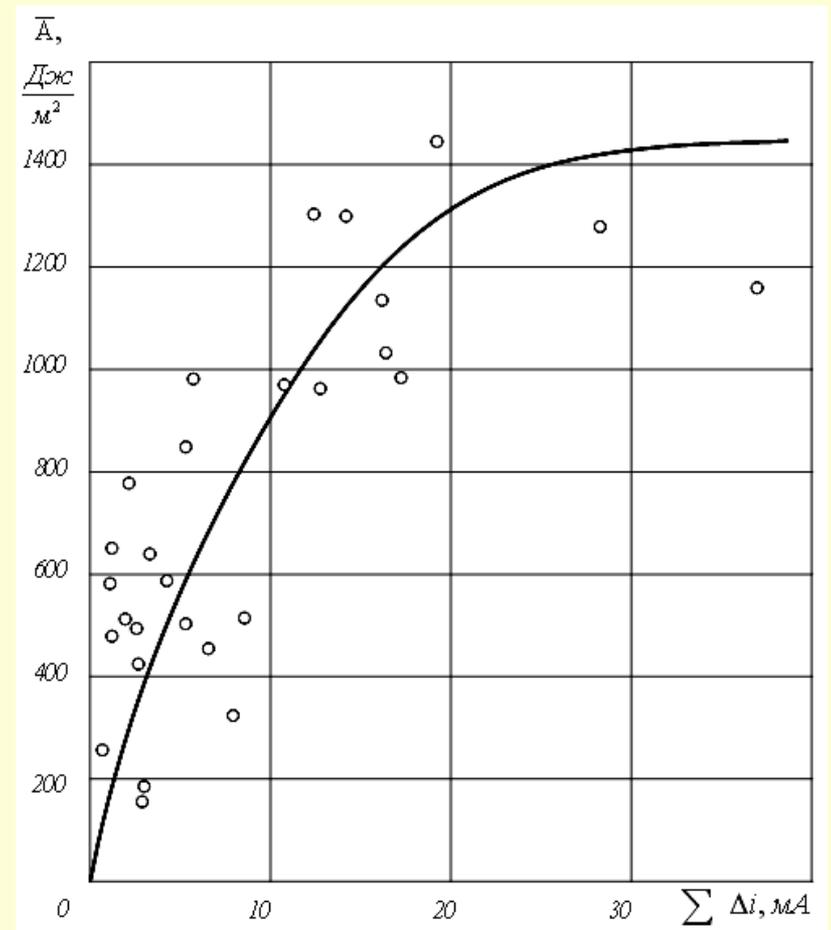
Неразрушающий контроль прочности ЭАС по току



Зависимость тока от времени в случае, когда электроадгезионное соединение произошло

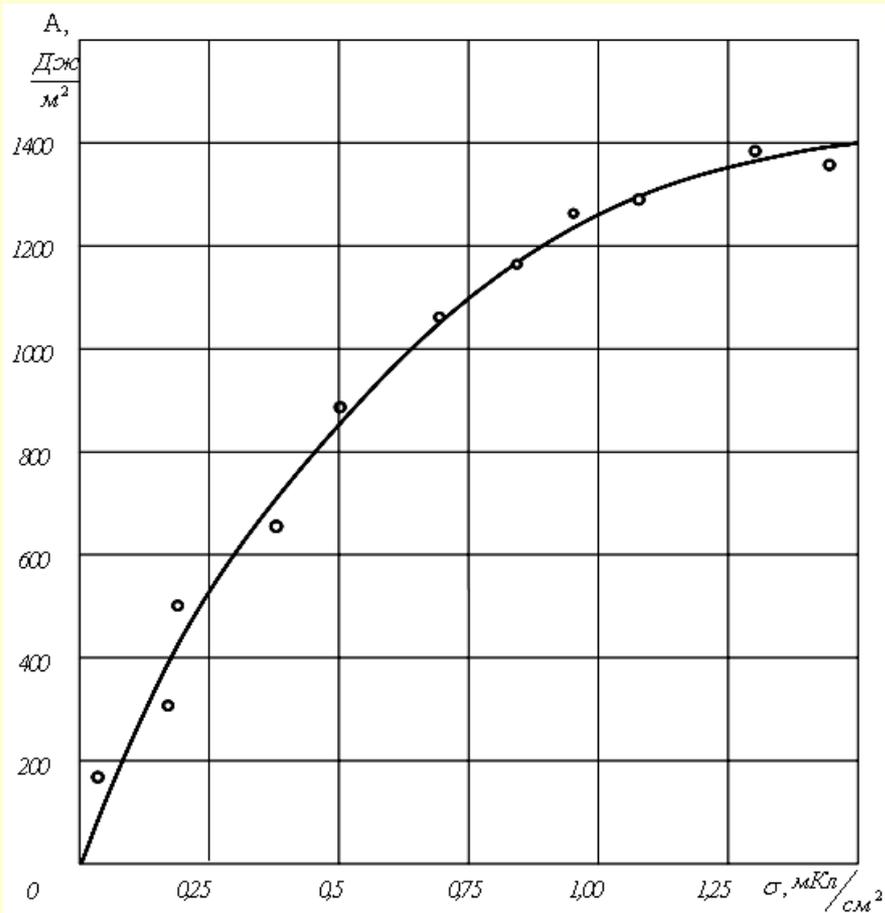


Зависимость тока от времени в случае, когда электроадгезионное соединение не произошло



Зависимость работы отрыва от суммы бросков силы тока при получении ЭАС

Неразрушающий контроль прочности ЭАС по заряду

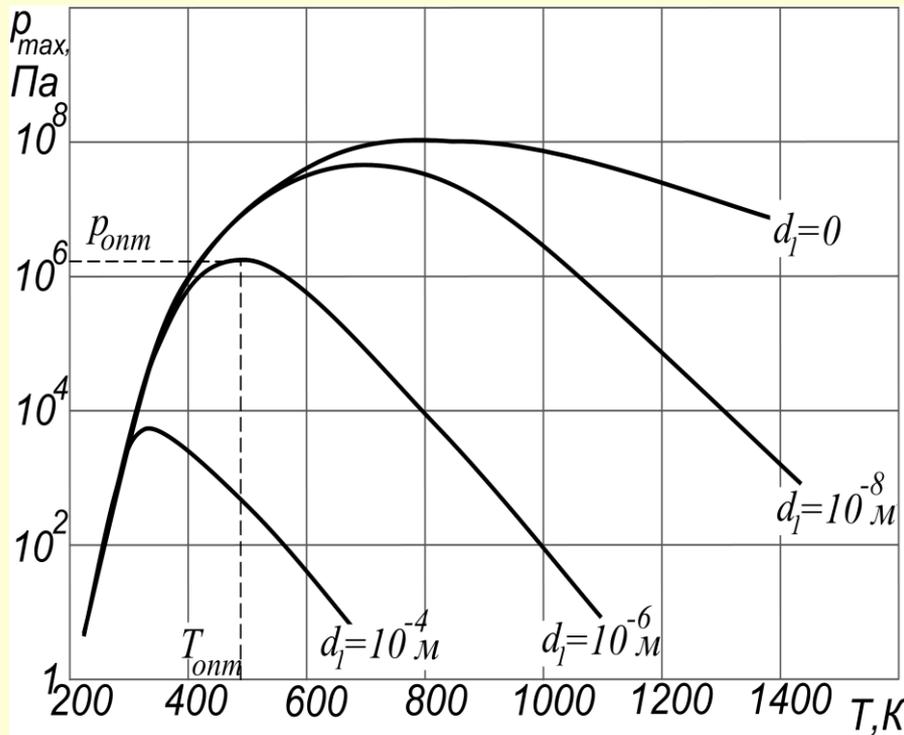


№ образца	Q, МКл	$\sigma, \frac{\text{МКл}}{\text{см}^2}$	Прочность ЭАС	
			по предлагаемому способу	по известному способу
1	1,00	0,250	510	500
2	1,25	0,313	663	652
3	1,31	0,328	746	790
4	1,80	0,450	841	840
5	2,20	0,550	900	895
6	2,62	0,655	1052	1017
7	2,98	0,745	1127	1140
8	3,70	0,925	1259	1239
9	4,30	1,075	1338	1353
10	5,72	1,430	1403	1400

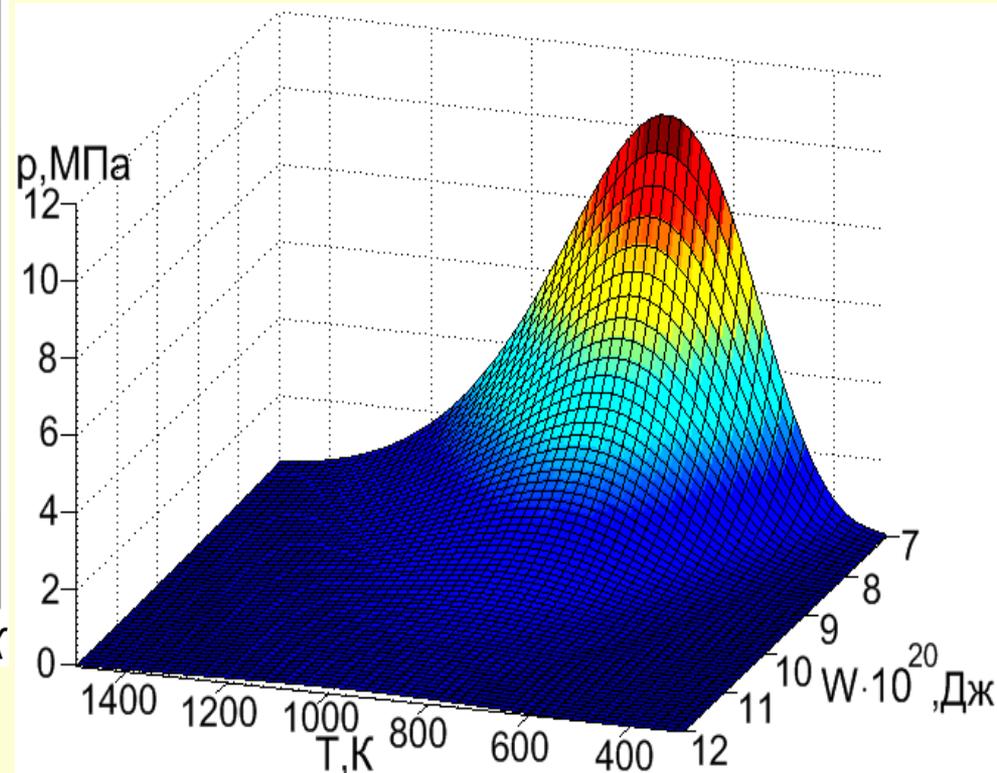
Оптимизация режима получения электроадгезионного соединения

$$\rho = q \cdot n_0 \cdot \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

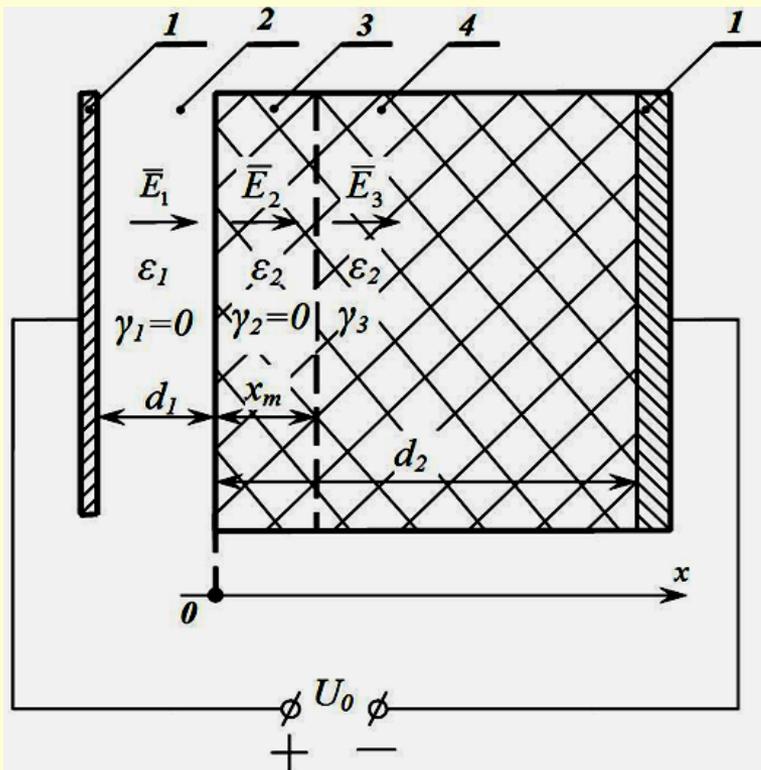
$$U_0 = U_{0\text{пр}} = U_{0\text{К}} \exp[-B(T - T_K)]$$



Зависимость максимального пондеромоторного давления от температуры при различных толщинах воздушного зазора



Зависимость максимального пондеромоторного давления от температуры и энергии активации ионов

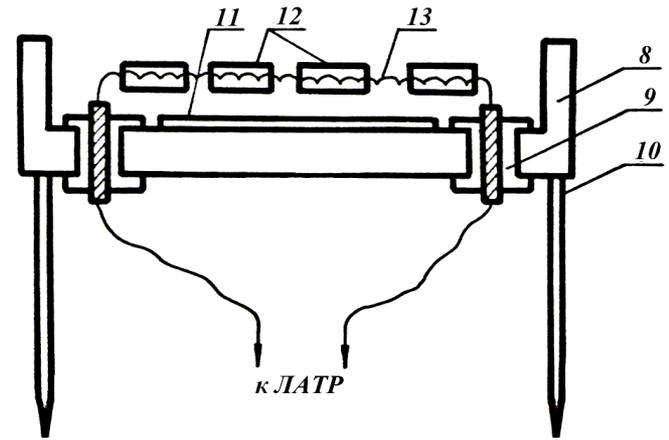
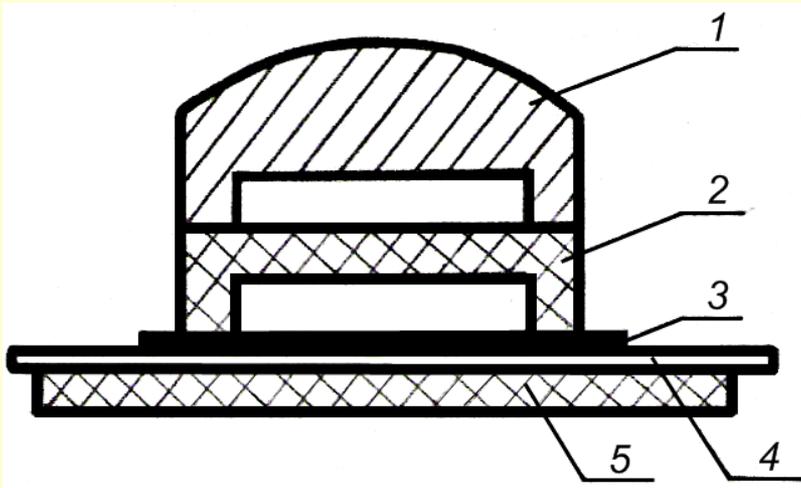
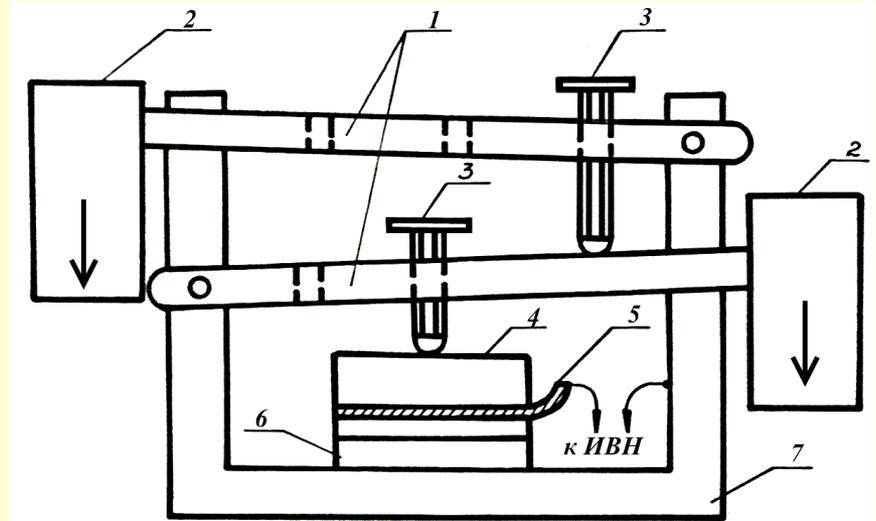
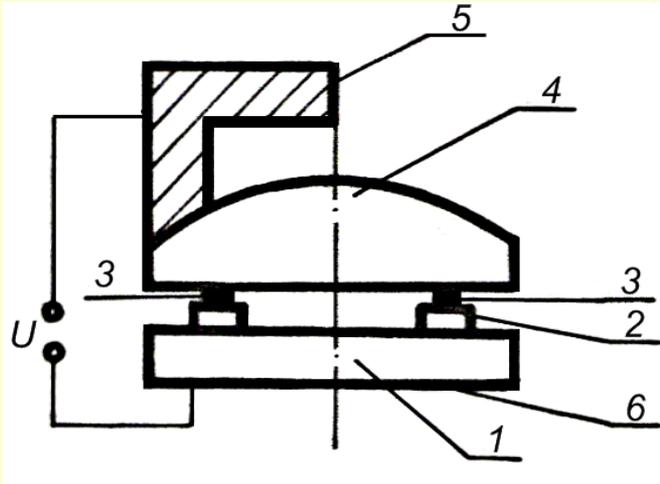


$$\rho = q \cdot n_0 \cdot \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

$$U_0 = U_{0\text{пр}} = U_{0K} \exp[-B(T - T_K)]$$

$$T_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{W}{kB}}$$

Использование механических силовых приспособлений для уменьшения температуры получения электроадгезионного соединения кварц – металл



Полимер – металлические электроадгезионные «склейки»



Медицинские пластины, покрытые электретом для фиксации сломанных костей

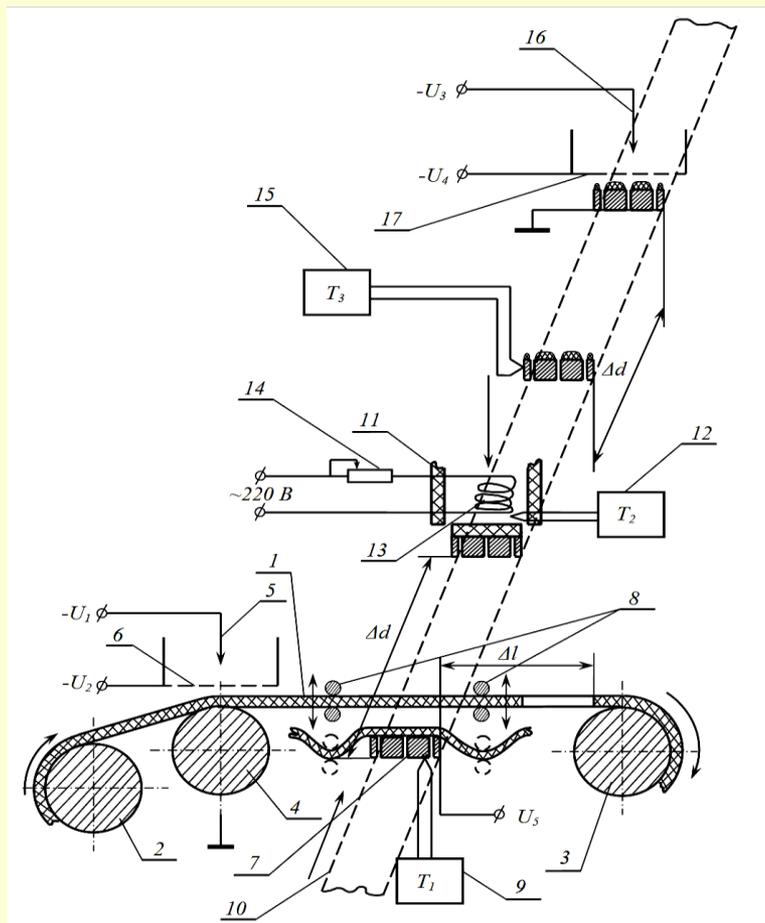
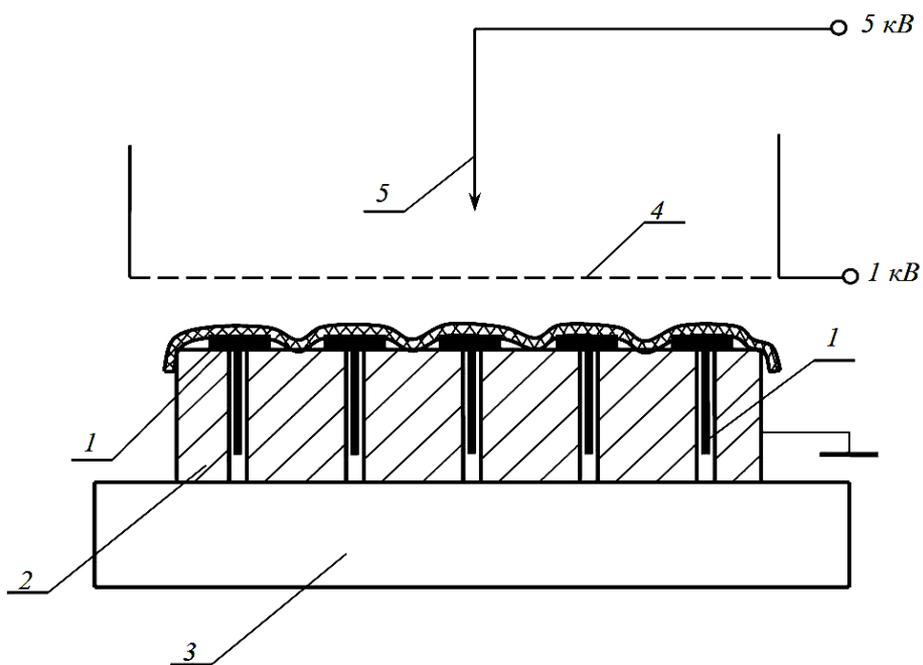
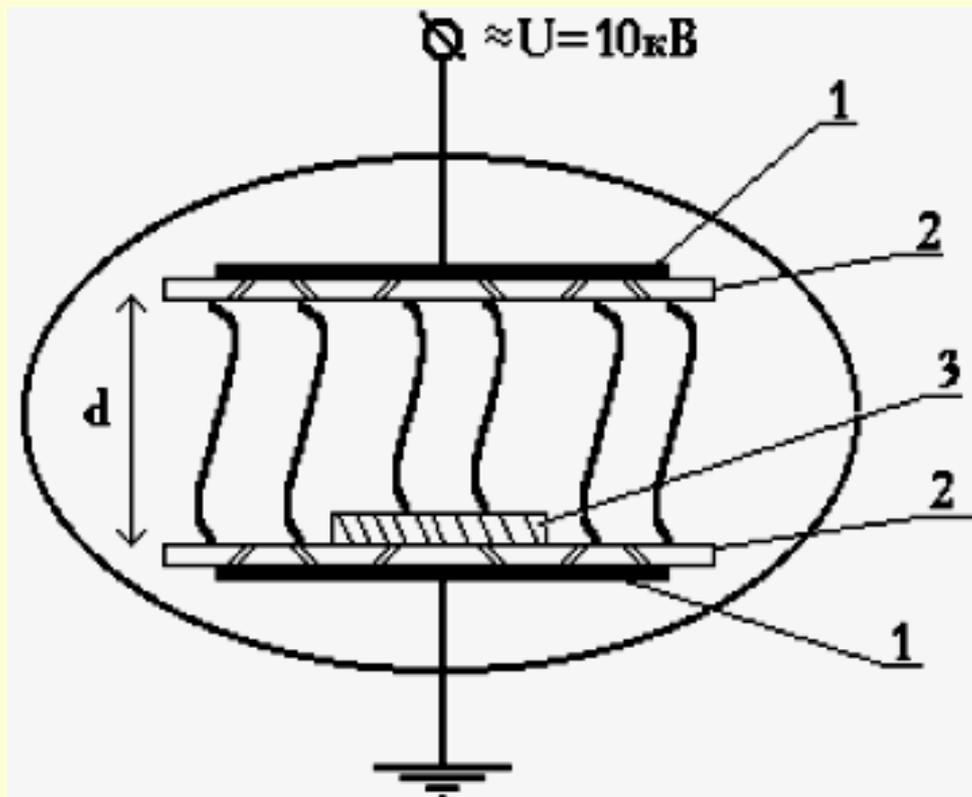
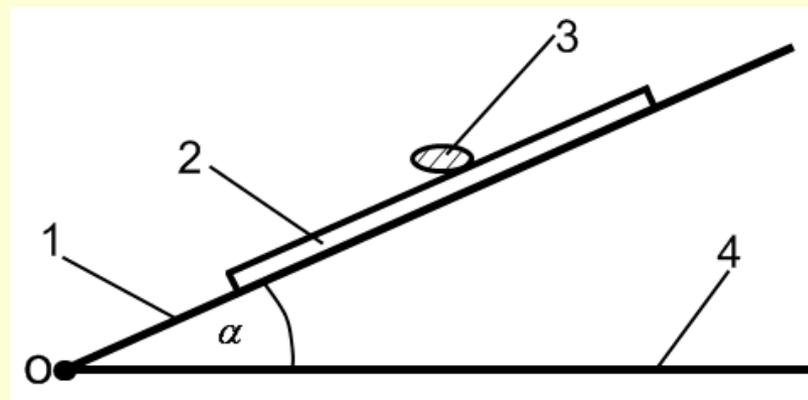


Схема получения ЭАК полимер-металл

Использование барьерного разряда для повышения адгезионной способности поверхности



Принципиальная схема классического БР. 1 - металлические электроды, 2 - диэлектрики, 3 - кремниевая пластина, d - расстояние между электродами



Оснастка для оценки адгезионных свойств поверхности. 1 – подвижная плоскость, 2 – исследуемый образец, закрепленный на подвижной плоскости 3 – капля воды, 4 – горизонтальное основание

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОРАЗРЯДНОМ РЕАКТОРЕ

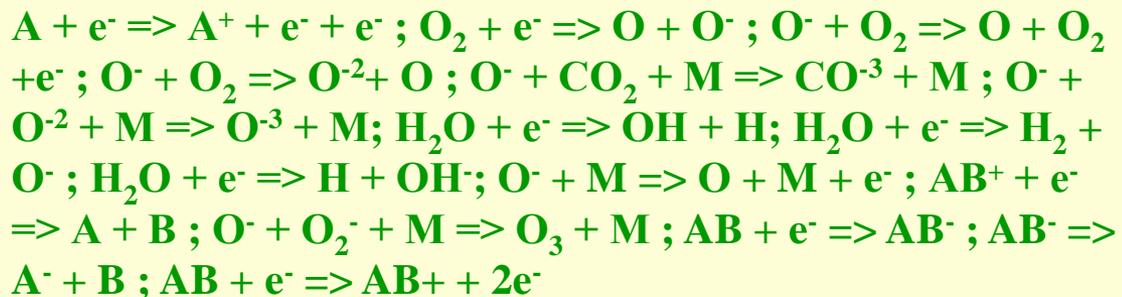


Внешний вид установки для модификация поверхности материалов обработкой в плазме низкотемпературного объемного разряда

Процессы, которые протекают в газоразрядном реакторе можно условно разделить на 3 фазы:

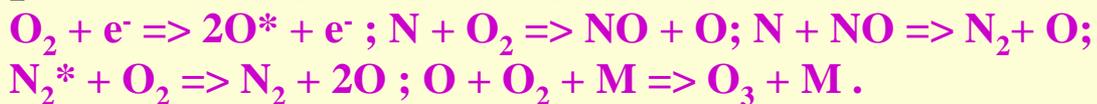
1. собственно газоразрядную фазу с

характерным временем порядка 0,001 – 1мкс:



2. фазу атомно-молекулярных

реакций с характерным временем порядка 1 - 10 мкс:



3. фазу течения газа в реакторе, диффузии атомных и молекулярных частиц в потоке и "медленных" химических реакций с характерным временем порядка 10 мкс - 0,1 с.

Примеры использования плазмохимической обработки материалов

1. Производилась обработка полированных пластин-подложек из поликристаллической окиси алюминия - поликора ЩЕ 0,78.000ТУ для последующей металлизации и изготовления микросхем.

2. Производилась обработка контактных площадок микросхем покрытых слоем металлов Cr (0,1 мкм) - Cu(5 мкм) - Au(2 мкм) для последующей микросварки.

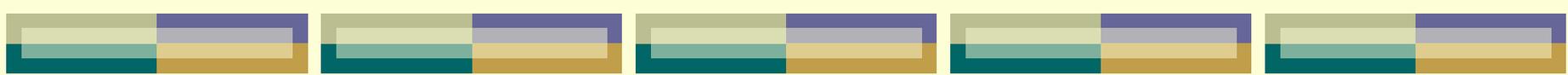
3. Проводилась обработка поверхности деталей из фторопласта пред склейкой. *Контрольные образцы активировали по известной технологии (по ОСТ 11054279-78) в натрий-нафталиновом комплексе. Склейка фторопласта производилась с латунью, имеющей гальваническое покрытие из никеля и олово - висмута. Использовался клей ВГ-25-200 без наполнителя. Средний предел прочности клеевого соединения для фторопласта в обоих случаях составил 30 кг/см², однако предлагаемый способ обработки поверхности в объемном разряде емкостного типа экологически чист, существенно проще и дешевле.*

4. Были проводились эксперименты по применению низкотемпературной газоразрядной плазмы барьерного разряда в воздухе в различных технологиях:

- для обработки углеродных волокон с целью улучшения их адгезии к связующим (эпоксидным компаундам);
- для дезинфекции и стерилизации документов на тонких бумажных носителях;
- для обработки стекол перед их тонированием и т.д.

5. Был проведен экспресс-эксперимент по исследованию влияния обработки низкотемпературной газоразрядной плазмой на смачиваемость образцов тонких микропористых структур (пористый листовой ПВХ, тонкая бумага).

Во всех экспериментах обнаружен положительный эффект

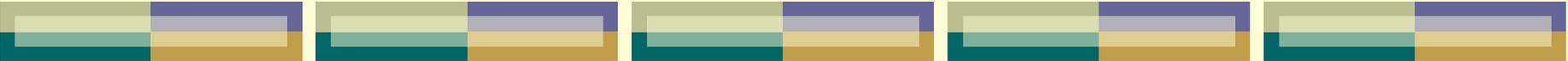


Использование электрического поля для повышения качества покрытий шершаво – пористых поверхностей композиционными диэлектрическими материалами



За счет электроадгезионных сил композитное покрытие эффективно втягивается в поры на металлической поверхности. Возможны варианты ремонта сколов облицовки непосредственно во рту пациента по схожей технологии

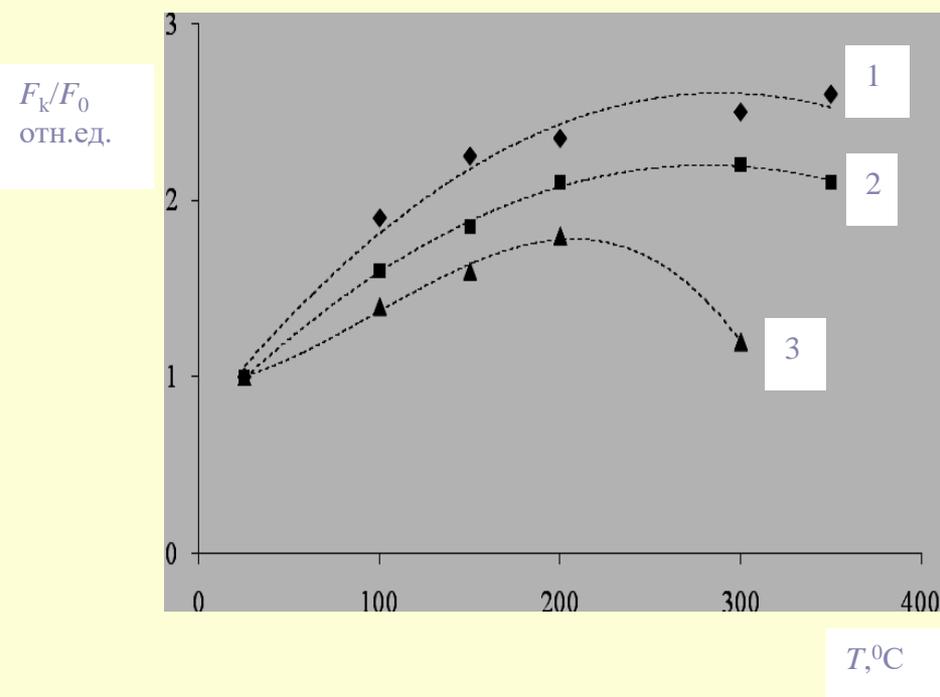




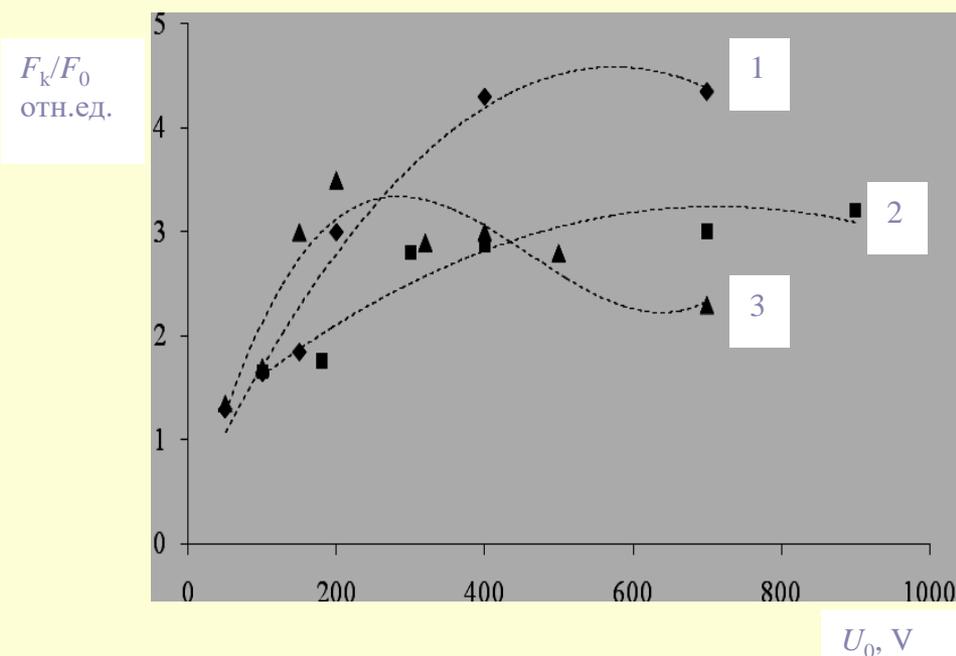
2. Повышение адгезии
наносимых на подложки
пленок и управление их
характеристиками с
помощью электрического
поля



УЛУЧШЕНИЕ АДГЕЗИИ ЗАРАНЕЕ НАНЕСЕННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

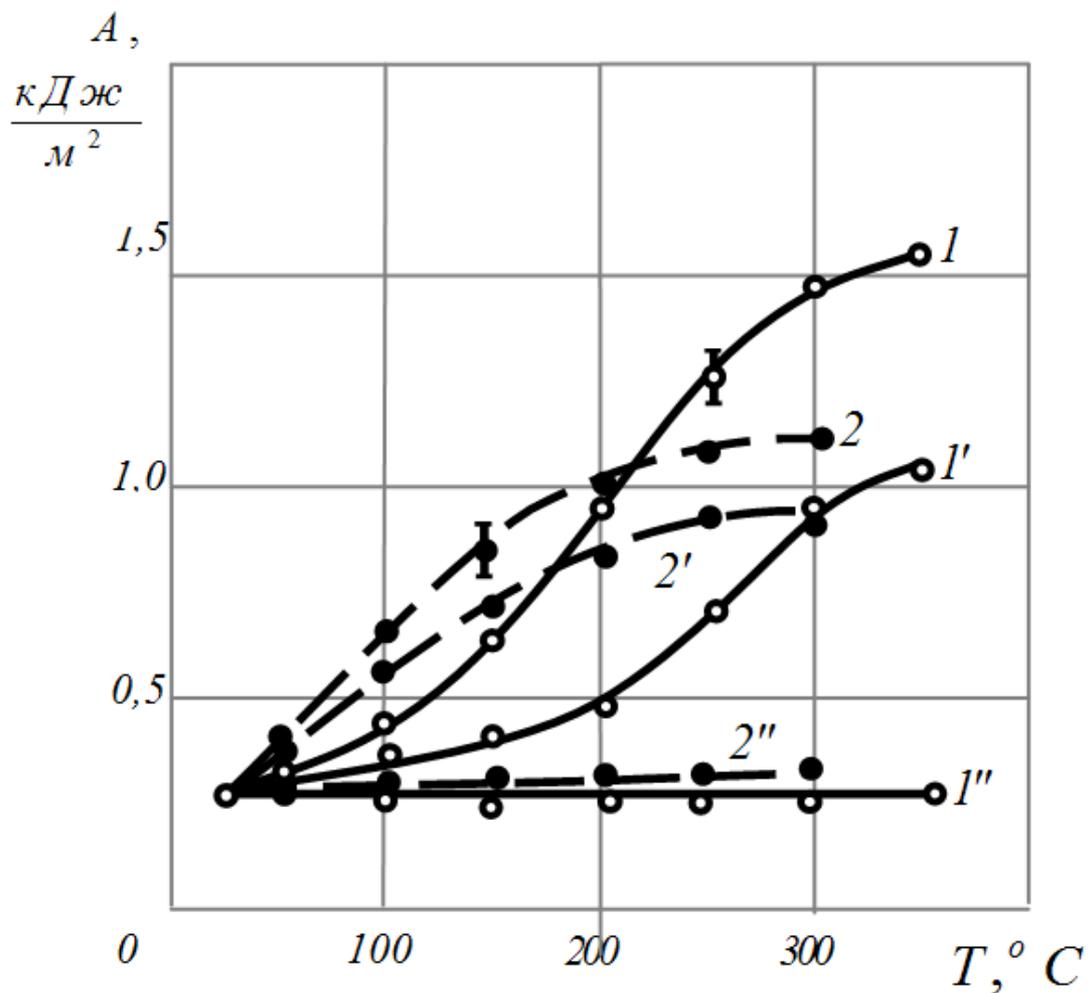


Температурные зависимости адгезии молибденовой пленки к подложкам из стекла С47-1. Время выдержки $t = 10$ мин. 1 – напряжение $U_0 = 300 \text{ В}$, 2 – $U_0 = 0 \text{ В}$, 3 – $U_0 = -300 \text{ В}$.



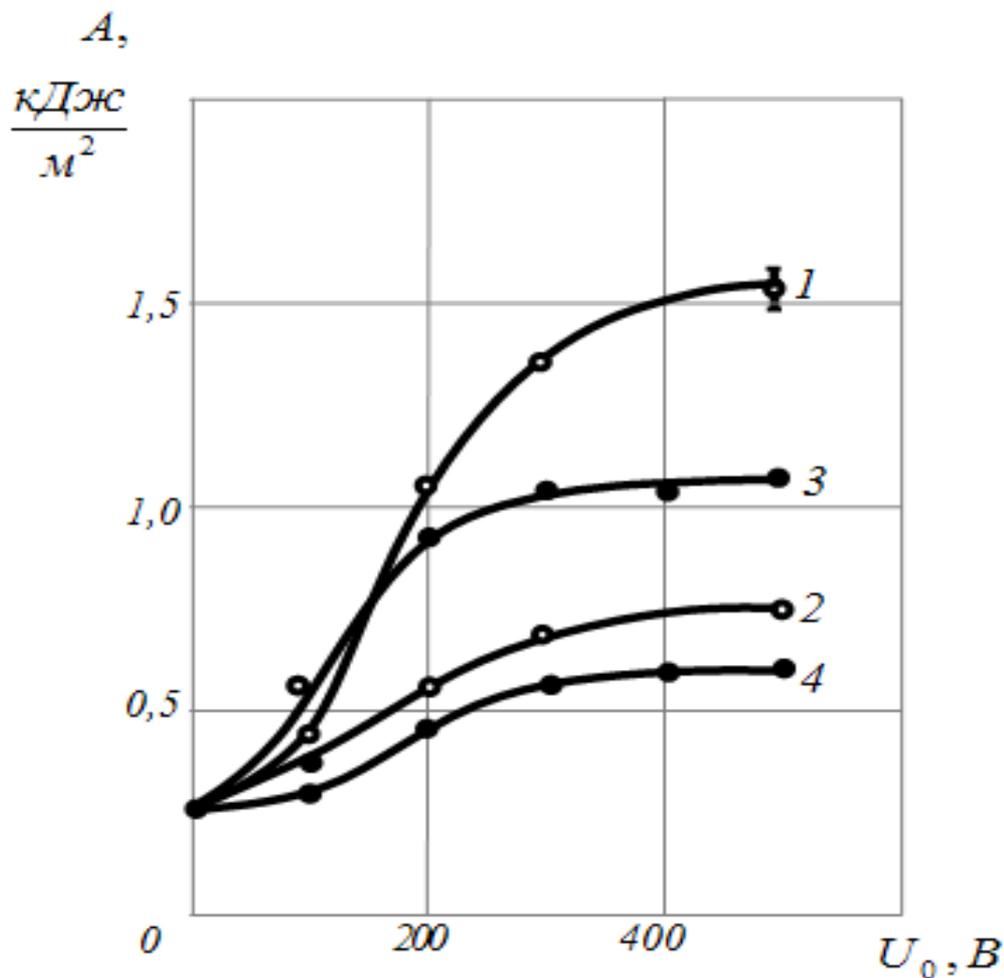
. Влияние электрического напряжения на адгезию медной пленки к подложкам из стекла С47-1 (1, 2) и оконного стекла (3). 1 – $T = 200 ^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин.; 2 – $T = 100 ^\circ\text{C}$, $t = 5$ мин.; 3 – $T = 200 ^\circ\text{C}$, $t = 5$ мин.

Зависимости работы отрыва медной (пунктир) и алюминиевой (сплошные линии) пленок к подложкам из оконного стекла от температуры электроадгезионной обработки



Время выдержки $t = 10$ мин для кривых 1, 2 ($U = 300\text{ В}$) и $t = 5$ мин – для кривых 1'', 2'' ($U = 0$) и 1', 2' ($U = 300\text{ В}$). Адгезия пленок измерялась при комнатной температуре.

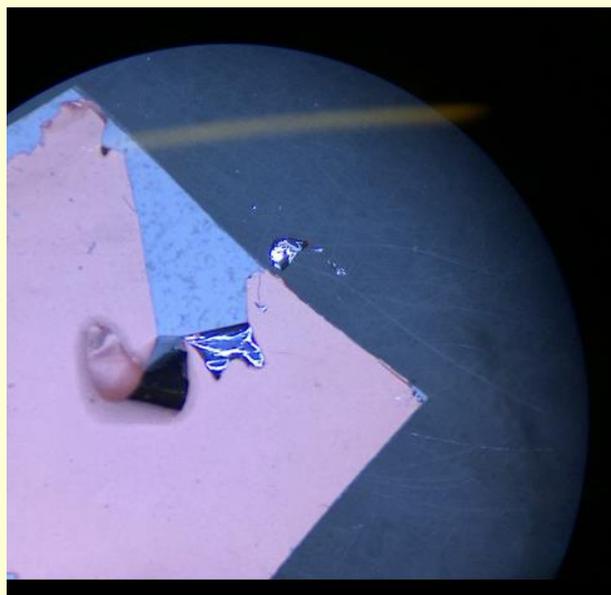
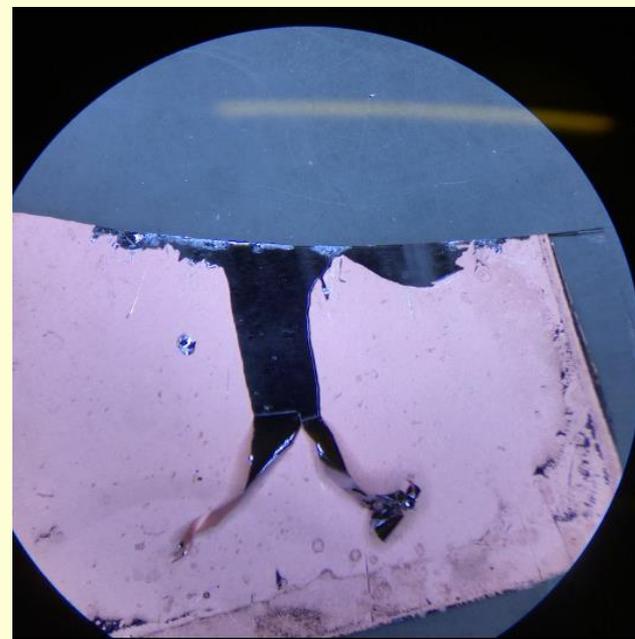
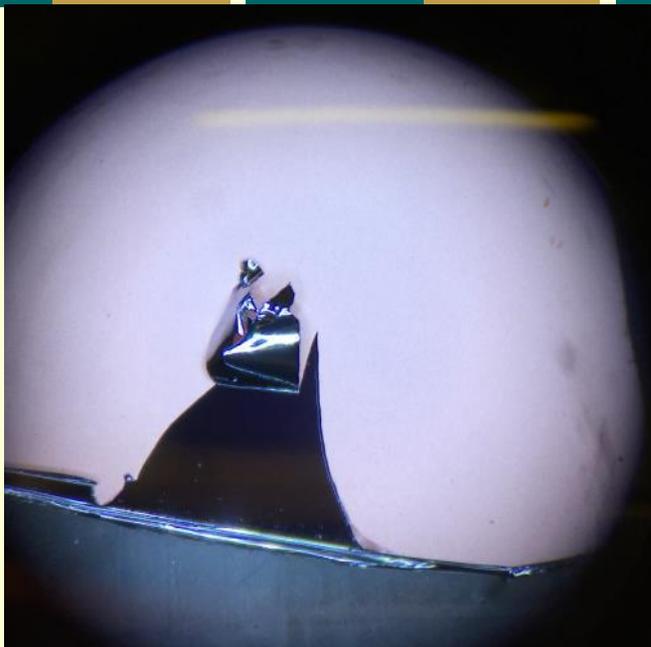
Влияние напряжения на работу отрыва алюминиевой пленки к подложкам из оконного стекла при различных временах выдержки и температурах



1 – $T = 300^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин;
2 – $T = 200^\circ\text{C}$, $t = 10$ мин;
3 – $T = 350^\circ\text{C}$, $t = 5$ мин;
4 – $T = 250^\circ\text{C}$, $t = 5$ мин







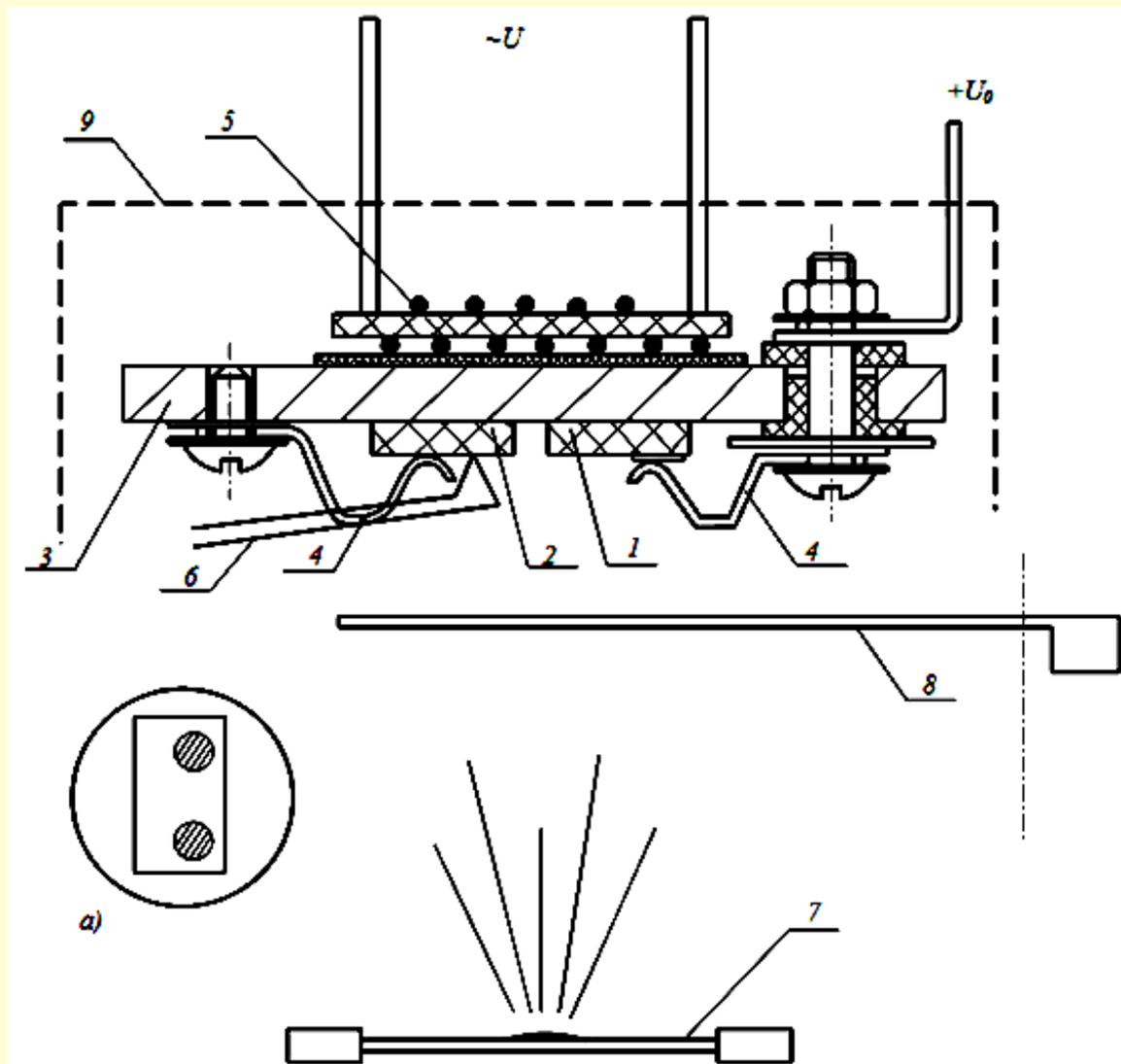
Субъективно мне
кажется, что эффект все
равно есть

08:48

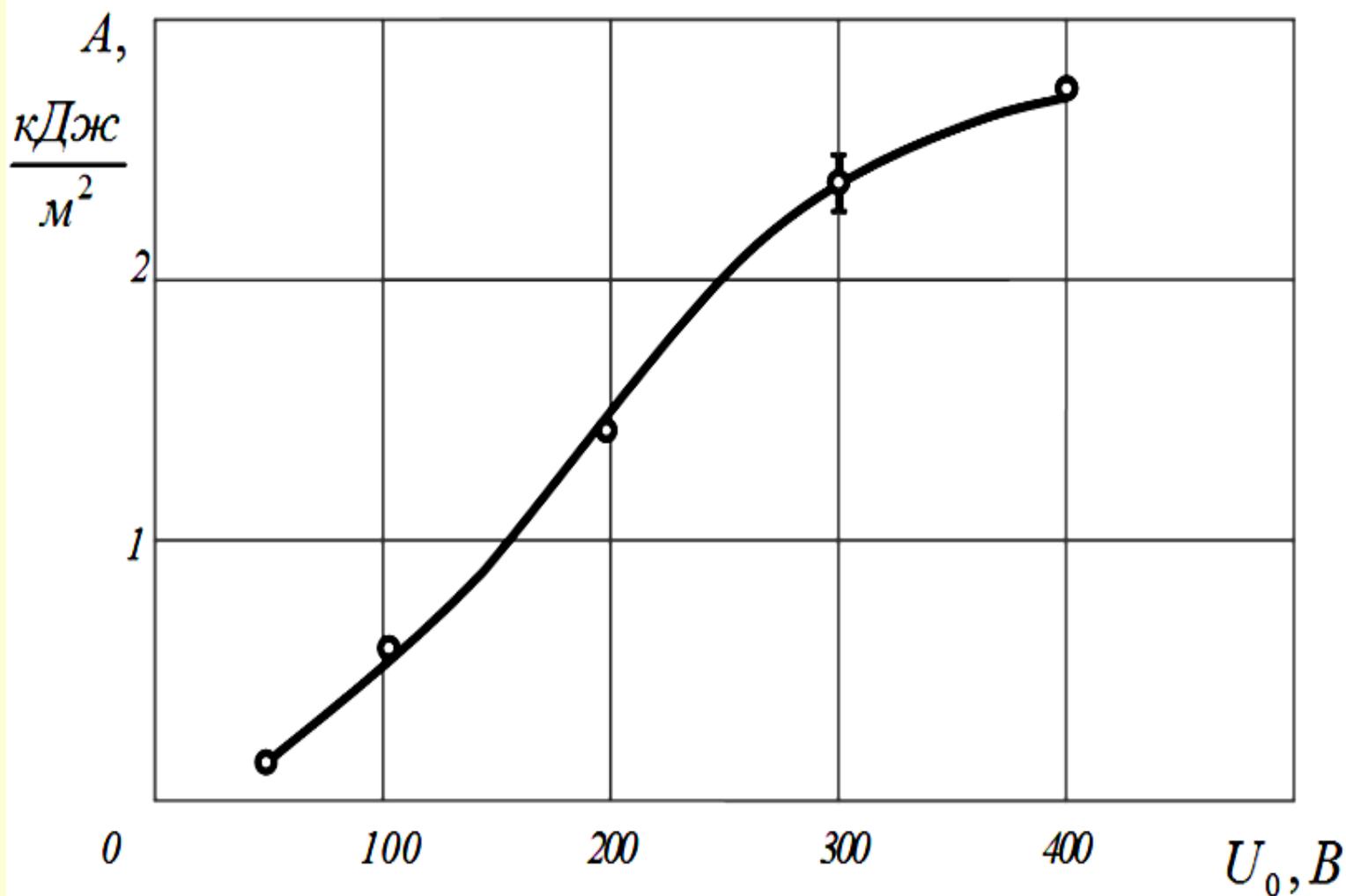
То есть отходит куда
менее охотно

08:49

Повышение адгезии электропроводящих пленок в процессе нанесения их на диэлектрические покрытия



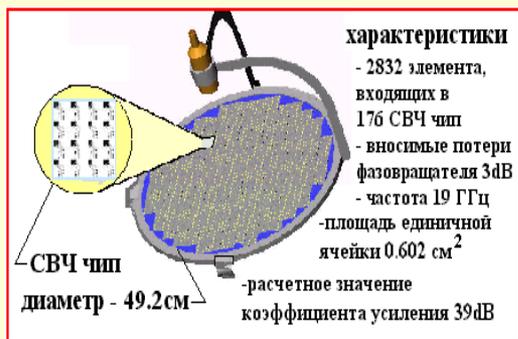
Оснастка для использования электроадгезионных сил в процессе вакуумного нанесения пленки. 1,2 - подложки, 3 - тепловыравнивающее основание, 4 - пружина, 5 - нагреватель, 6 - термопара ХК, 7 - испаритель, 8 - заслонка, 9 - тепловой экран
а) подложка 1 (вид сверху)



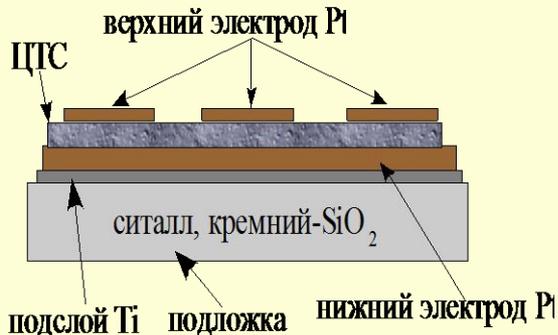
Зависимость адгезии алюминиевой пленки от электрического напряжения, использованного при ее электроадгезионной обработке. Температура подложки $T=120^\circ\text{C}$

Сегнетоэлектрические пленки с платиновыми электродами и их применение

СВЧ устройства



СЭ ФАР



Конденсаторная структура на основе пленки ЦТС

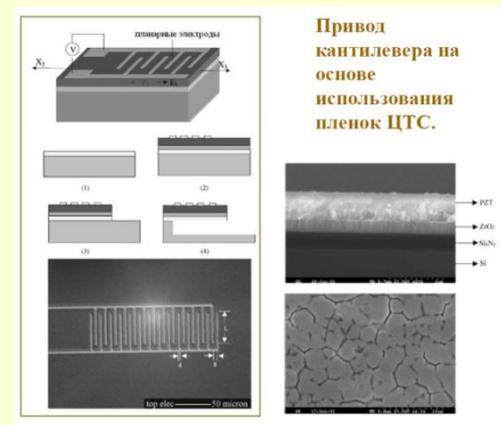
Энергонезависимая память



FeRAM фирмы RAMTRON

- Материал подложки: ситалл или оксидированный кремний
- Electrodes: проводящие оксиды, благородные металлы (Pt, Au), иридий и др. Ведущее место среди материалов для нижнего электрода занимает *платина*.
- Сегнетоэлектрики: $Pb(Zr_x Ti_{1-x})O_3$, $BaTiO_3$, $(Ba,Sr)TiO_3$

Электромеханические преобразователи



Основные проблемы, связанные с выбором материала нижнего электрода конденсаторных структур

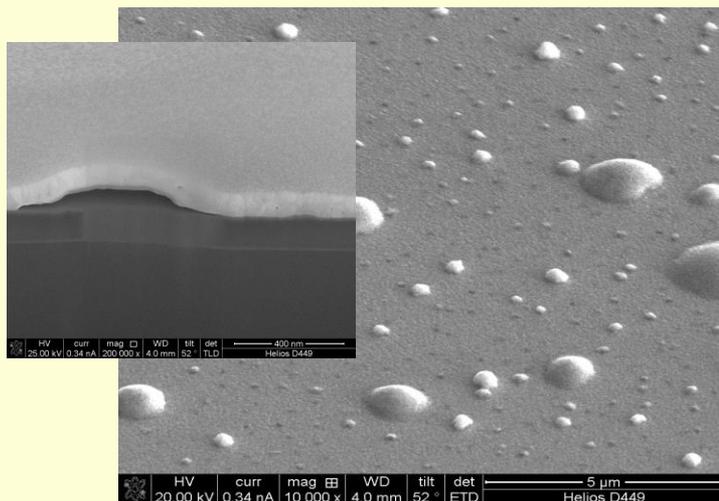
- Развитая морфология поверхности нижнего электрода
- Плохая адгезия к подложкам
- **Нестабильность** микрорельефа пленки при воздействии повышенной температуры ($\approx 600^\circ\text{C}$)

перовскит
пирохлор

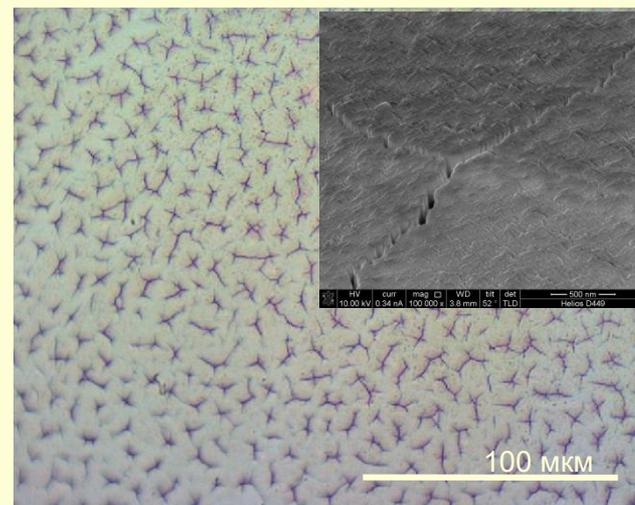


$$\alpha_{Pt} = 9,1 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

$$\alpha_{Si} = 2,33 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

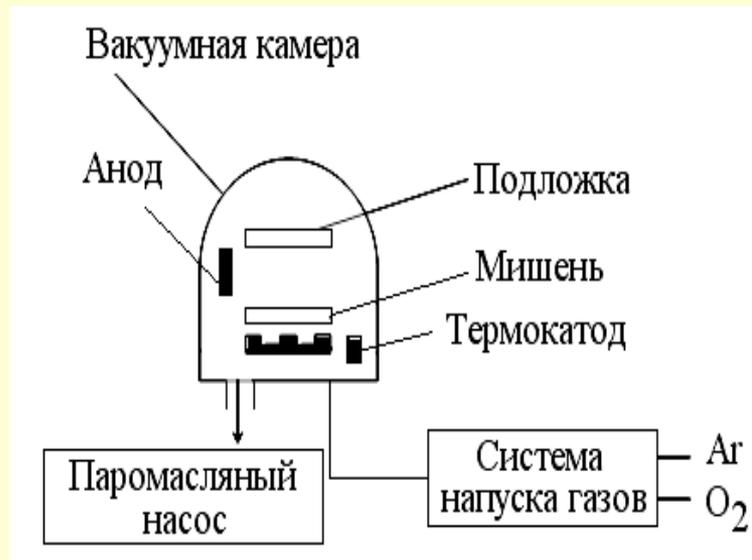
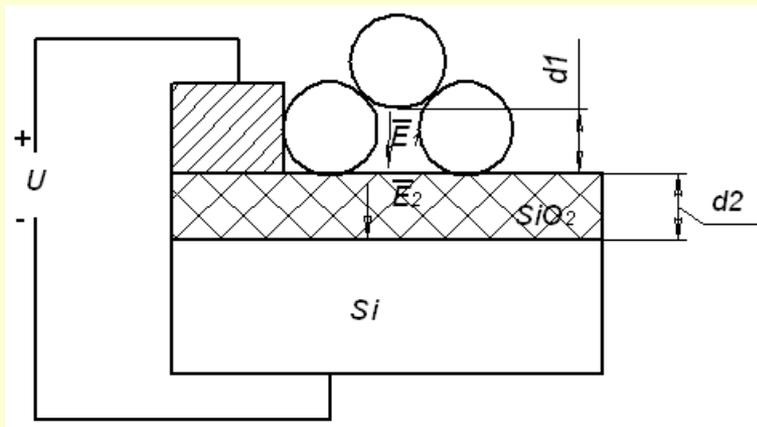


Поверхность и поперечное сечение пленки платины (СЭМ) после термообработки при 600°C на воздухе

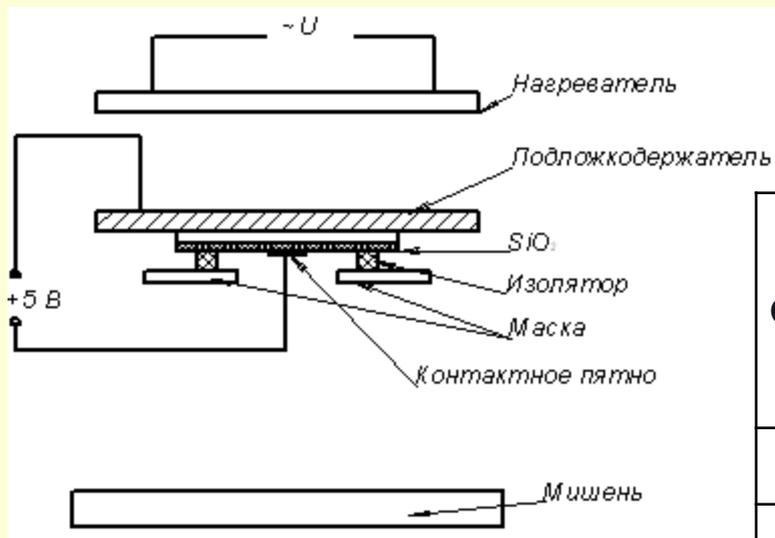


Поверхность пленки (ОМ и СЭМ) ЦТС после формирования сегнетоэлектрической фазы при $T=580^\circ\text{C}$ и $t=40$ мин на воздухе

Схема эксперимента и основные параметры нанесения платиновой пленки



Блок – схема установки ионно-плазменного распыления трехэлектродного типа

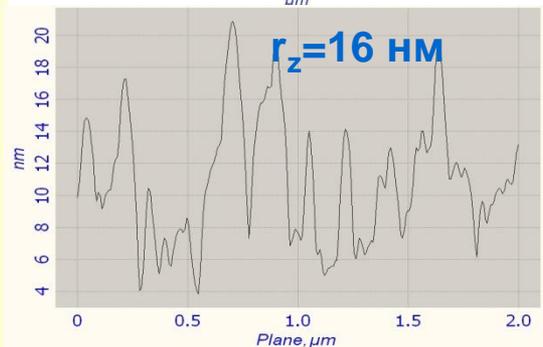
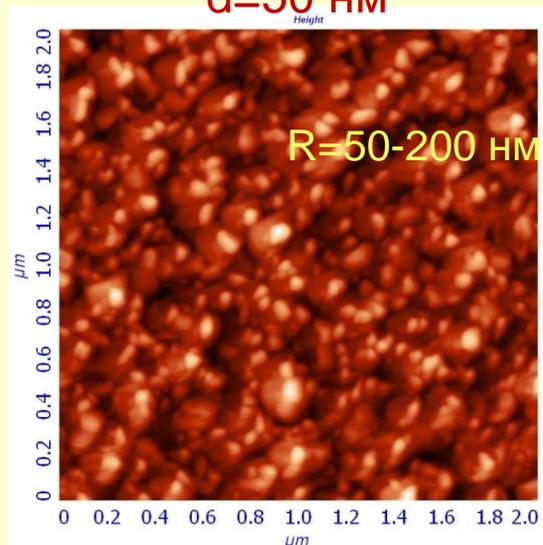


Подложкодержатель

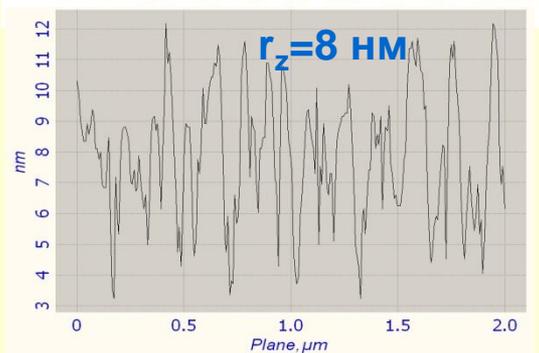
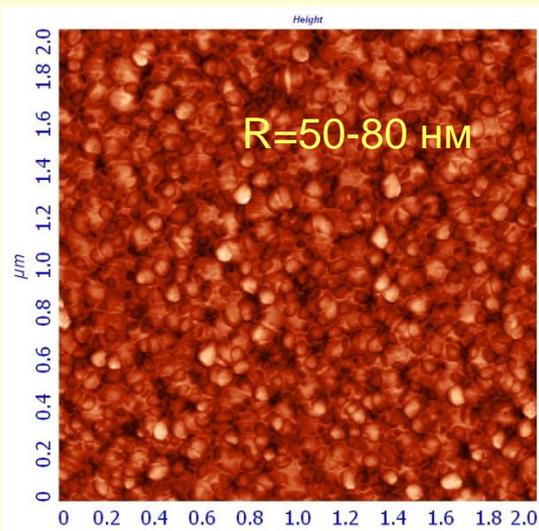
№ Образца	Температура подложки	Напряжение смещения, В. «+» на Pt	Толщина пленок Pt, нм	Скорость осаждения, нм/мин
1	300°C	5	100	5
2	300°C	—	50	2,5
3	300°C	5	50	⁴⁸ 5

АСМ изображение поверхности Pt пленки

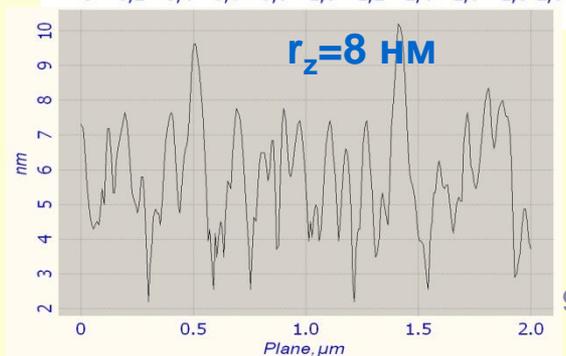
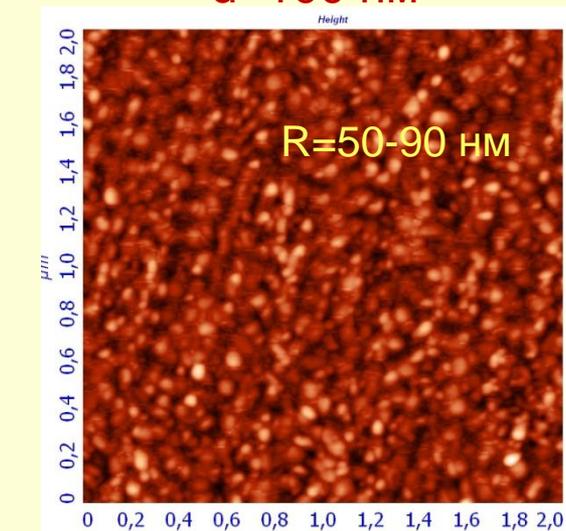
$U_{CM} = 0$ В
 $d = 50$ нм



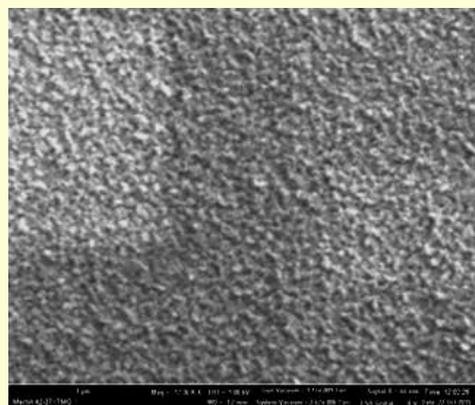
$U_{CM} = +5$ В
 $d = 50$ нм



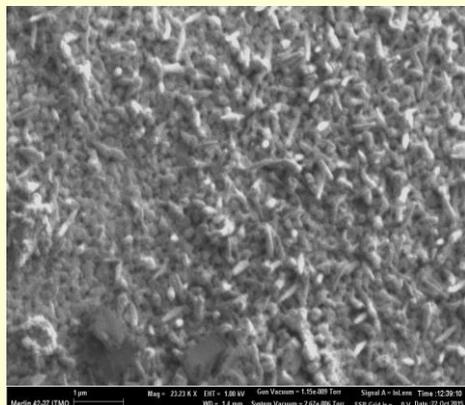
$U_{CM} = +5$ В
 $d = 100$ нм



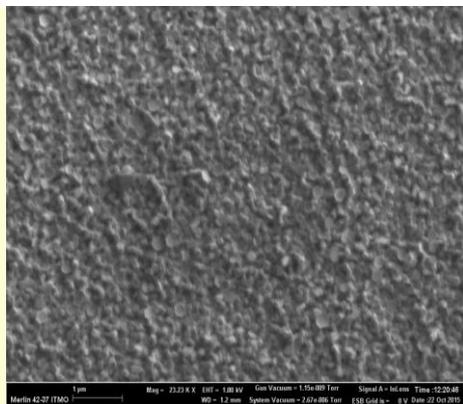
Влияние электрического поля и температуры на структуру поверхности цинковых пленок



a)



b)



c)

Из пленок цинка толщиной 15 мкм, полученных на стеклянных подложках методом лазерной абляции, в результате термообработки в атмосфере сухого воздуха и действия поперечного электрического поля возможно получение ZnO с развитой поверхностью, состоящей из одномерных монокристаллов нанометровых размеров.

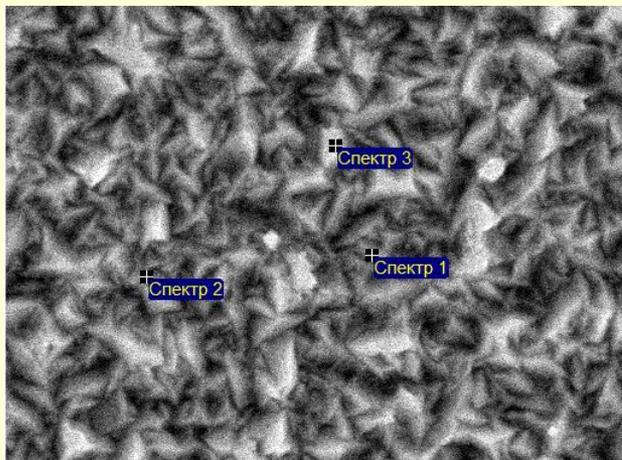
Изображение полученные методом сканирующей электронной микроскопии для исходной пленки Zn (a) и модифицированной пленки ZnO (b) на стеклянной подложке

a) - исходный образец

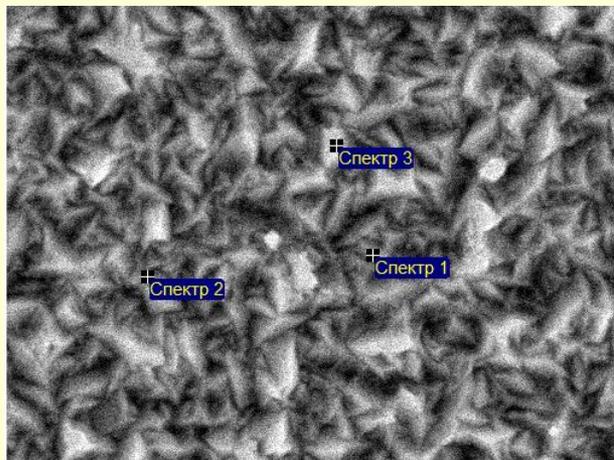
b) – совместное действие температуры и электрического поля

-влияние только температуры

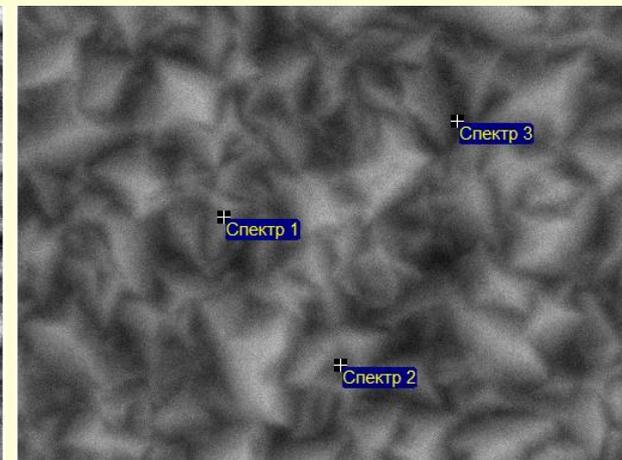
Электроадгезионная обработка пленок оксида цинка



Электронное изображение 1



Электронное изображение 1



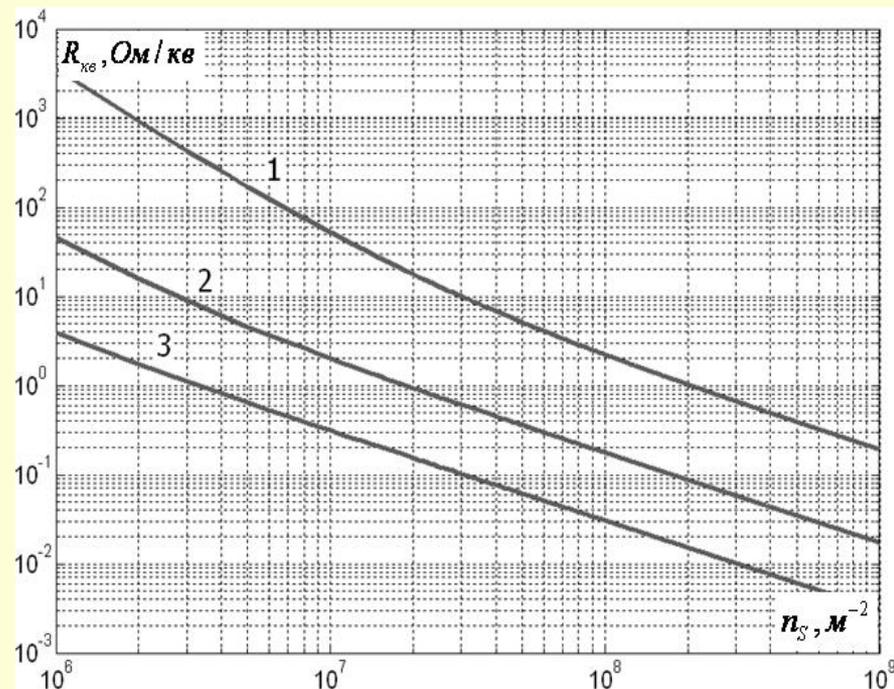
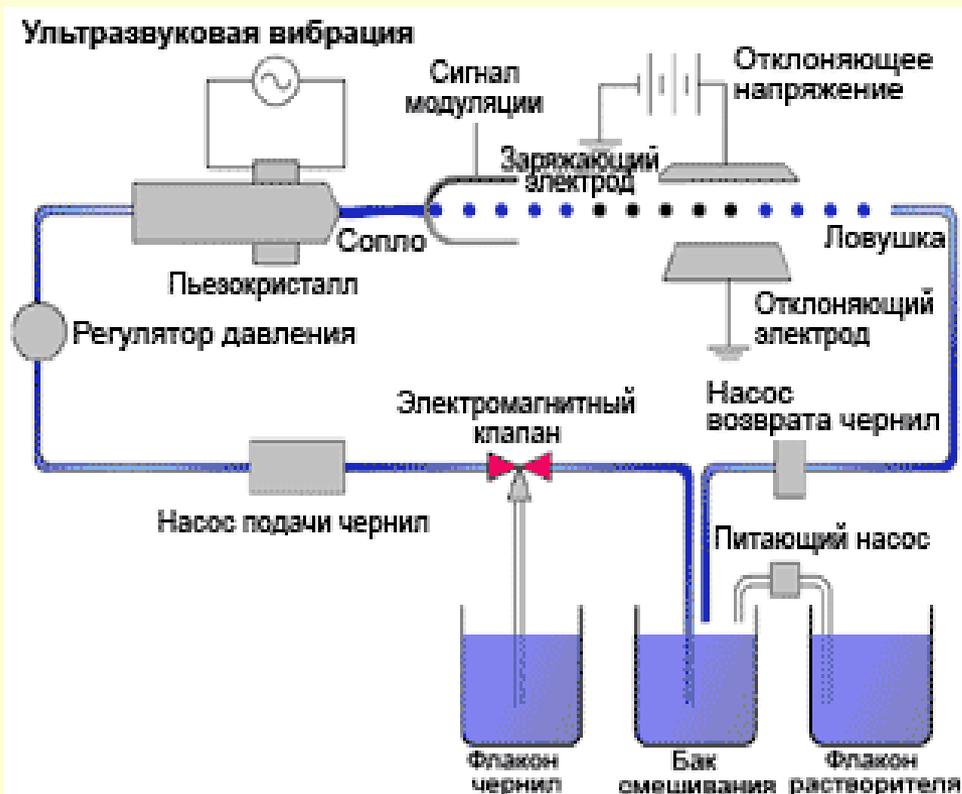
Электронное изображение 1

ZnO
легированный
бором, без
обработки,
исходный

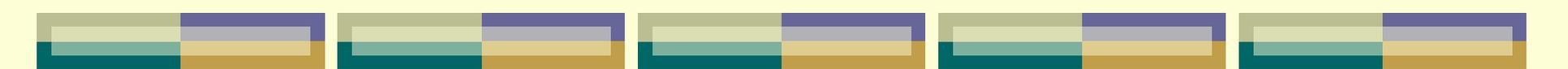
ZnO легированный
бором. Обработка
температурой 270
градусов Цельсия

ZnO легированный
бором. обработка
температурой 270
градусов Цельсия и
напряжением 300 В

Использование наносуспензированных жидкостей в электрокаплеструйной печати для получения проводящих топологий

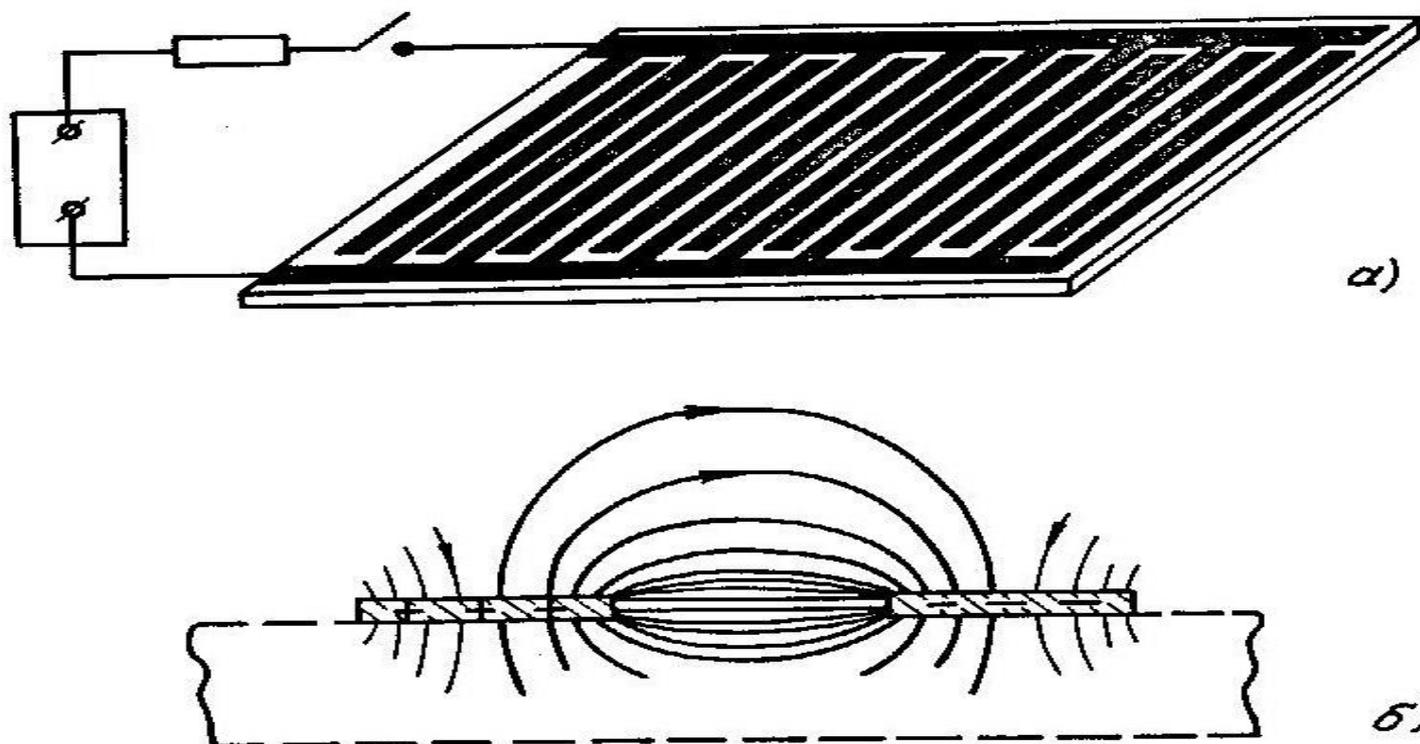


Во время печати символа каждая капля чернил под действием электрического поля направляется по требуемой траектории.



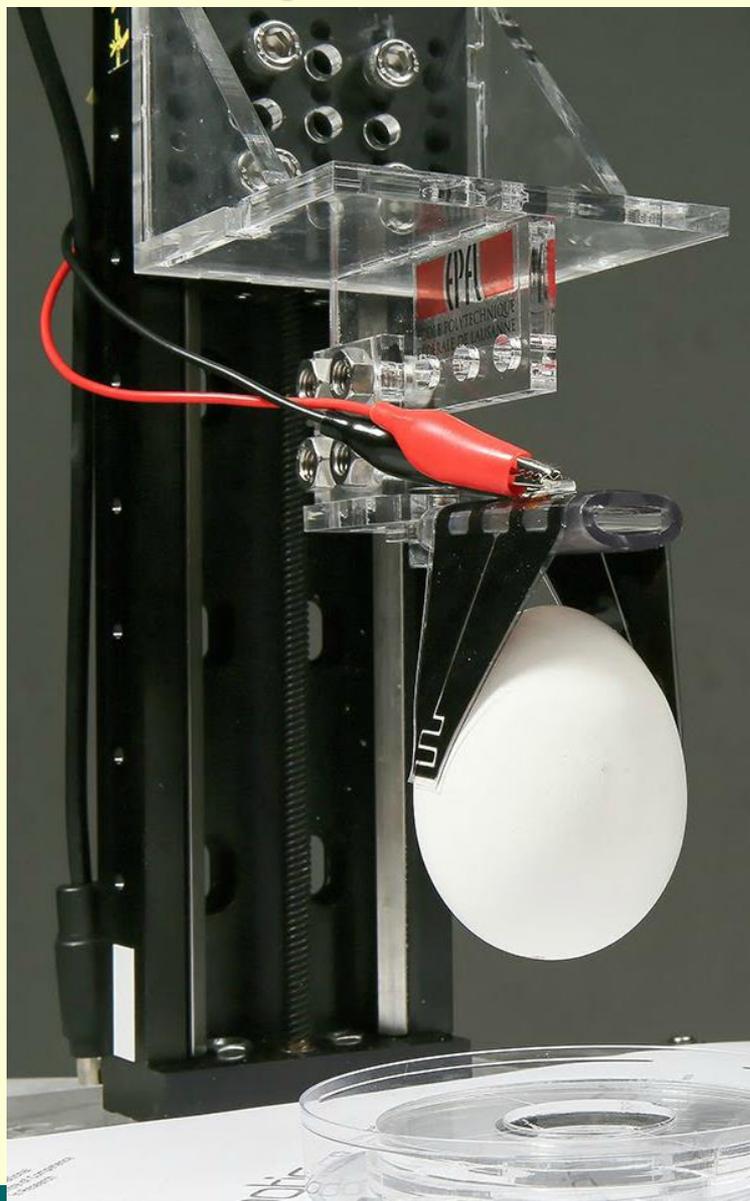
3. Применение силового действия электрического поля для обратимого соединения материалов в крепежных устройствах, в том числе, для манипулирования плоскими немагнитными и перфорированными изделиями

Управляемое закрепление листовых диэлектриков с помощью ЭП

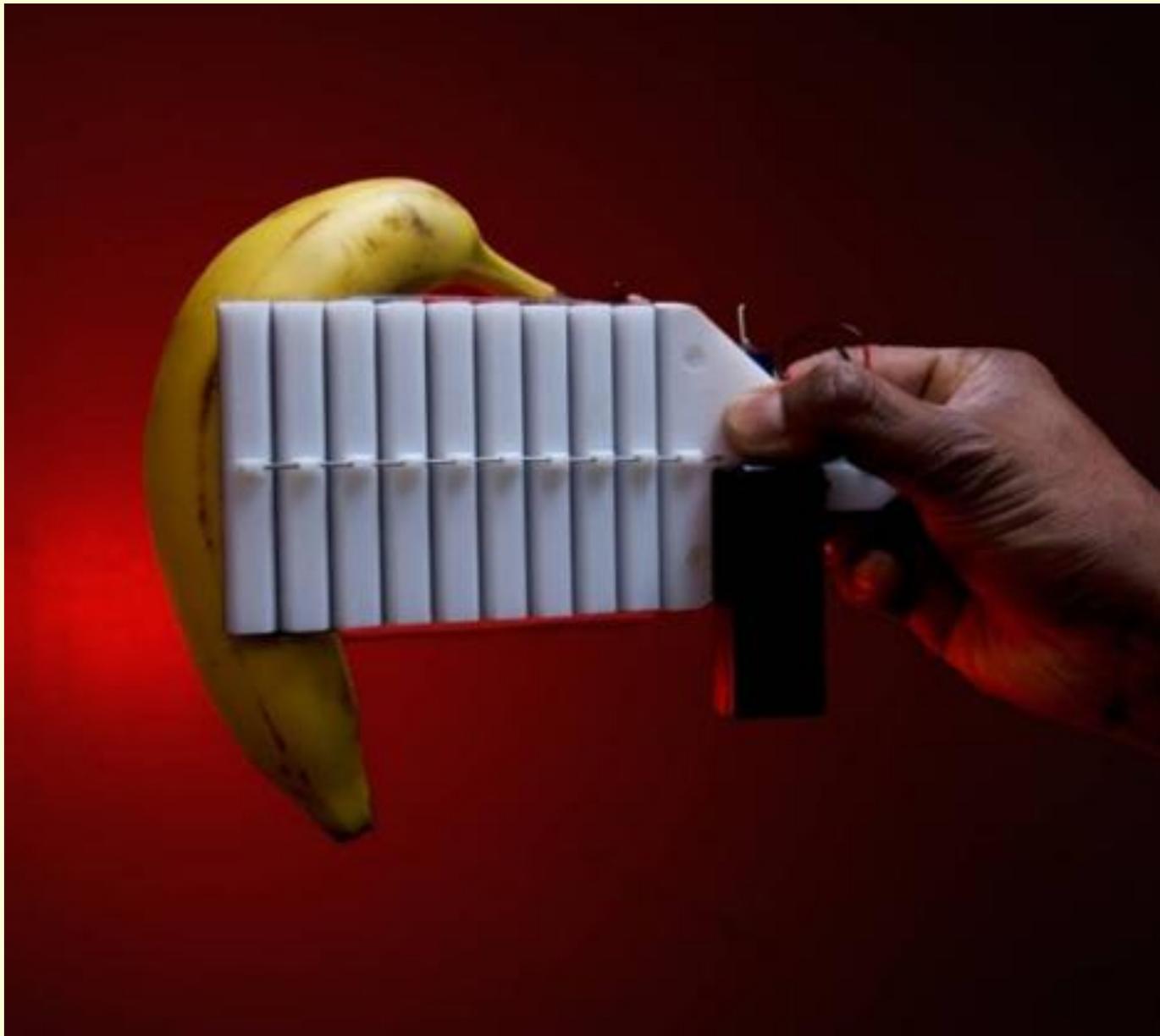
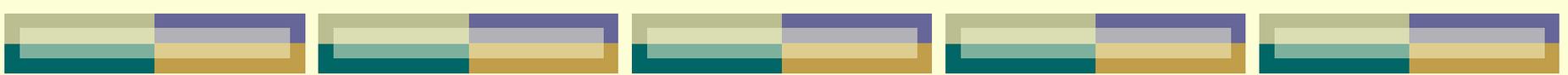


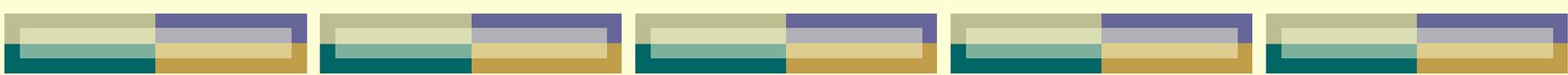
Планарное крепежное устройство (а) и картина электрического поля крепежной платы (б).

Управляемая электроадгезия

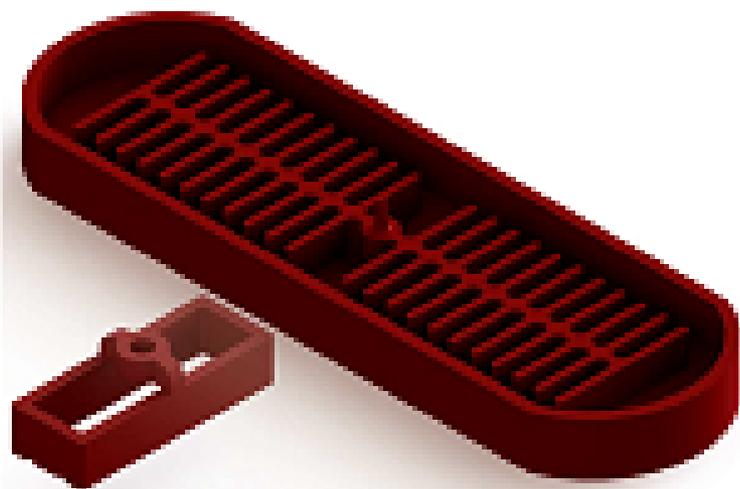


- Возможность закрепления магнитных и немагнитных материалов
- Низкое энергопотребление из-за низкого значения тока
- Простота изготовления и эксплуатации соответствующих устройств
- Возможность точного и плавного регулирования усилия
- Широкая область применения (крепёжные устройства, контроль шероховатости, электростатические пинцеты, манипуляторы)

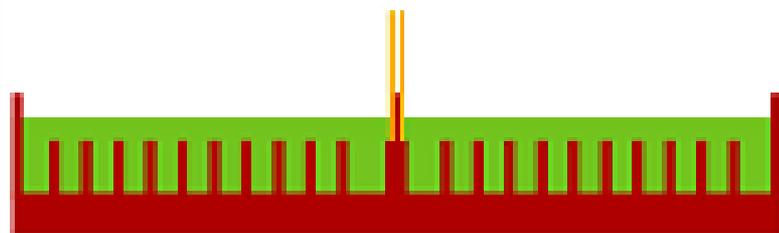




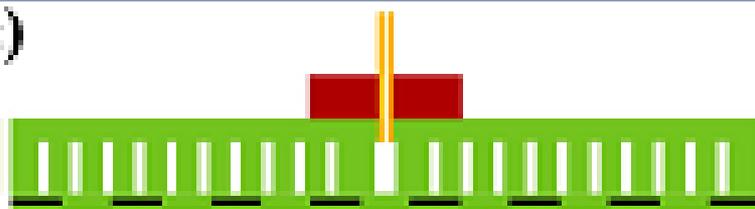
(a) Moulds 3D printing



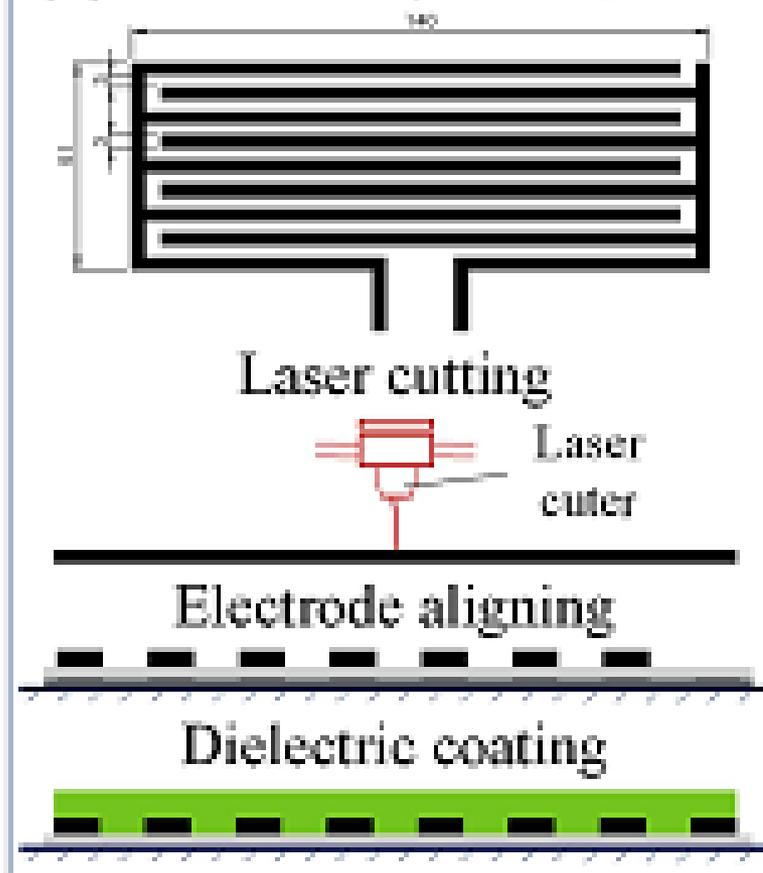
Moulding



(c)



(b) Electrode geometry



■ Conductive silicon

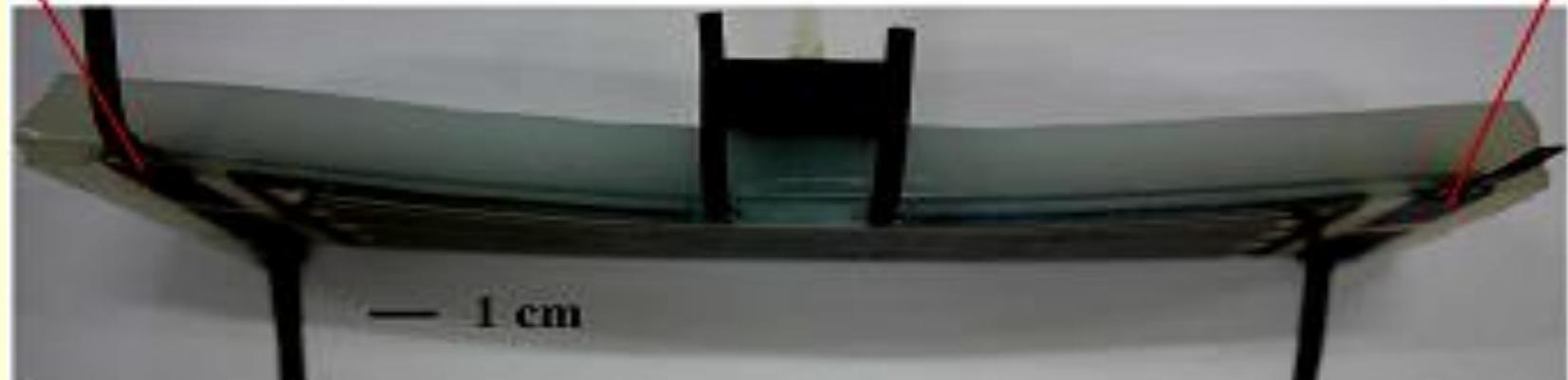
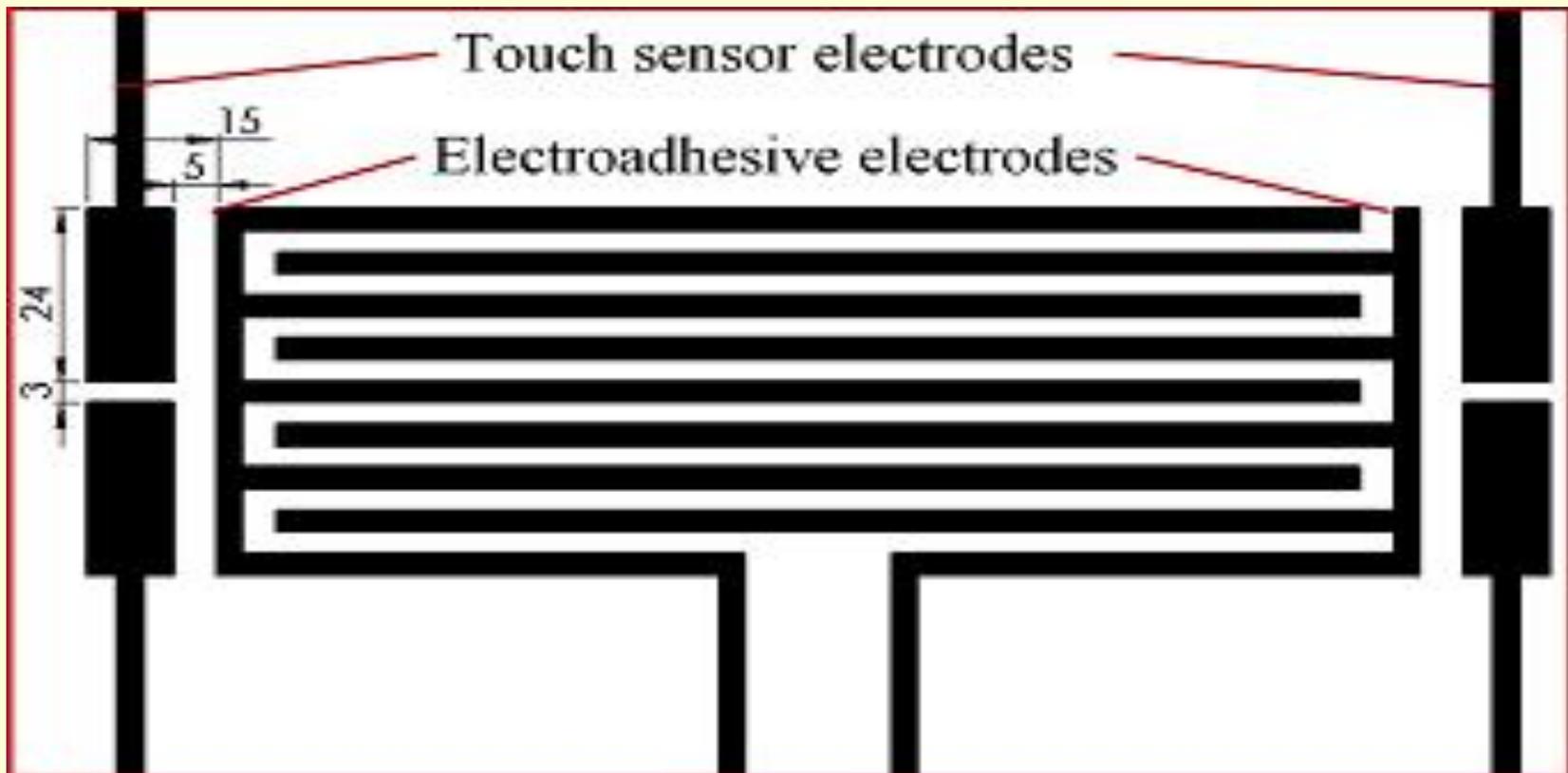
■ Clarifoil film

■ Ecoflex 00-50

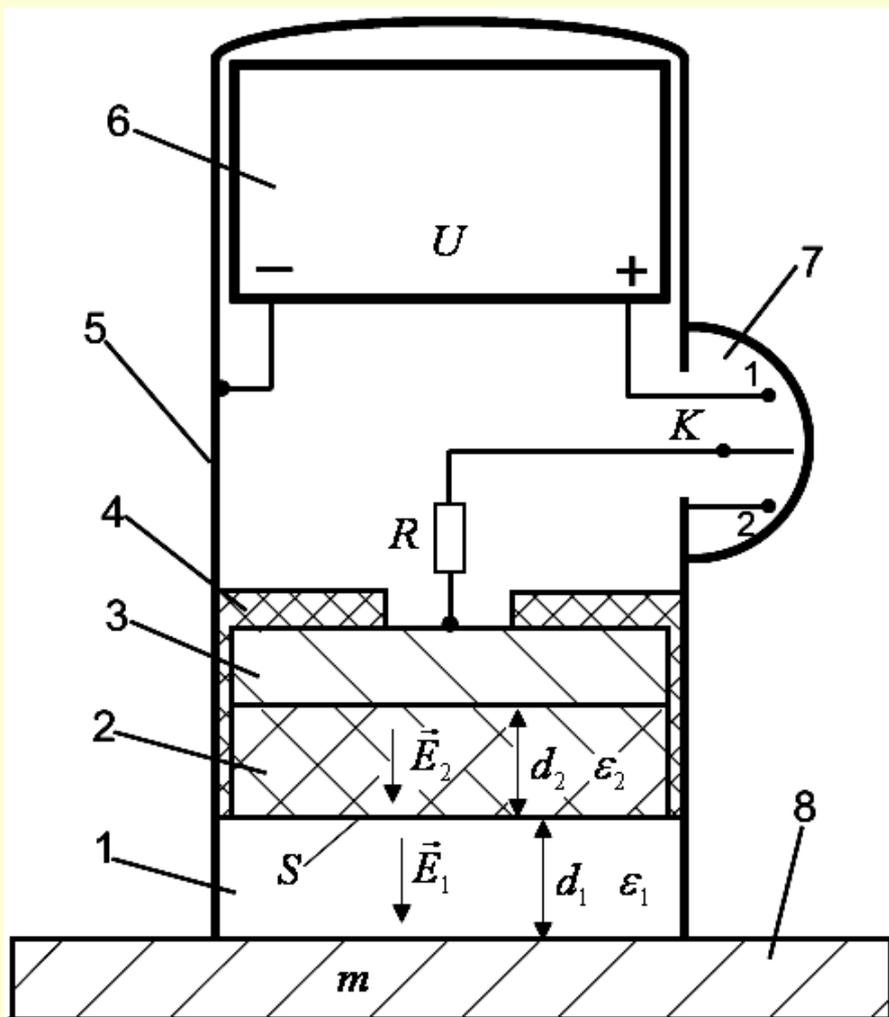
■ Inlet tube

■ ABS

■ Paper



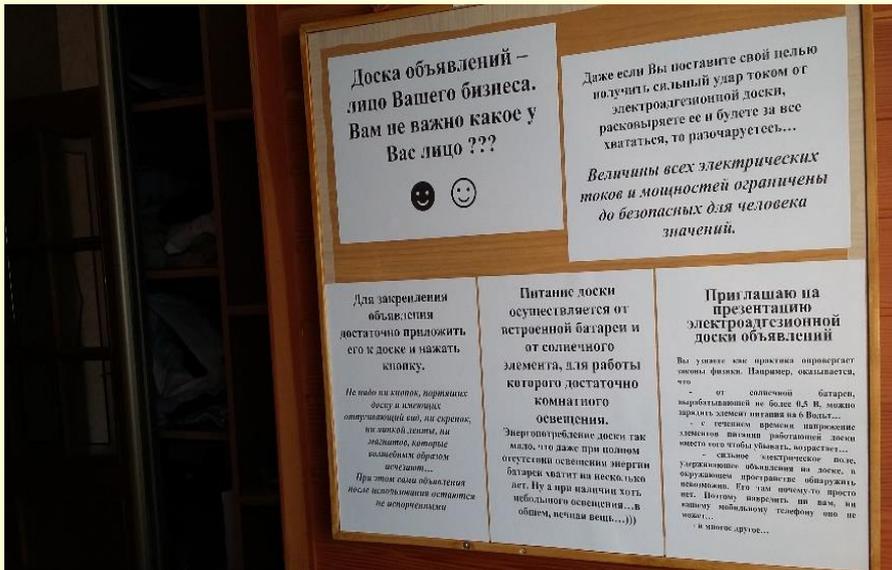
Электростатический пинцет

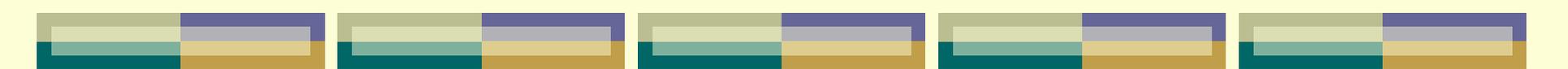


- 1 – воздушный зазор;
- 2 – полимерное защитное покрытие;
- 3 – электрод с «тянущей» площадью
- 4- изолятор;
- 5 - металлический корпус – трубка;
- 6 – малогабаритный высоковольтный источник питания напряжением (конденсатор большой емкости, имеющий малые токи утечки);
- 7 – переключатель режимов работы;
- 8 – поднимаемая электропроводящая (полупроводящая) плоская деталь массой ;
- R - высокоомный резистор, предназначенный для ограничения тока до безопасных значений (в положении 1 ключа), а также для ограничения тока разрядки (в положении 2 ключа).

Электростатическое «наклеивание» объявлений

Предлагаемая разработка (автор проф. Н.С. Пщелко) представляет собой электростатическое крепежное устройство, используемое в качестве доски объявлений. Данная разработка является инновационной, т.к. подобного рода доски объявлений промышленно не выпускаются





Основные достоинства предлагаемого технического решения

1. ЭДО позволяет легко закреплять и перемещать на ней представленную на бумаге информацию (объявления) – для закрепления и снятия листа бумаги не нужно использовать скрепки, кнопки, клеящуюся ленту, магниты и т.п. Достаточно просто приложить лист бумаги к доске и нажать кнопку, после чего он закрепляется на доске.

2. После использования объявления не портятся – снимаются они так же легко как и закрепляются, никаких следов на них не остается, и они могут использоваться в дальнейшем.

3. ЭДО может быть изготовлена относительно тонкой и легкой, ей можно придать необходимую расцветку, форму и т.п.

4. Поскольку энергопотребление при работе ЭДО минимально, она может работать от батареек (по расчетам до 10-ти лет при благоприятных условиях) или питаться от миниатюрной солнечной батареи, для функционирования которой достаточно комнатного освещения.

5. На поверхности ЭДО вместо листа бумаги может быть закреплена прозрачная пленка (снимается так же легко как и лист бумаги), на которой можно писать фломастером и стирать записи как на обычной доске. Поэтому ЭДО позволяет в процессе писания на ней удобно иллюстрировать записи заготовленными на бумаге рисунками. Отметим, что как традиционные старые доски для писания мелом или фломастером, так и современные мультимедийные интерактивные доски не позволяют **ОДНОВРЕМЕННО** эффективно использовать написание и иллюстрирование.

Принцип работы ЭДО основан на использовании пондеромоторных сил электрического поля, создаваемого между бумагой и внутренним электродом доски.

Снаружи поля нет, поэтому нанести вред пользователю или, например, его мобильному телефону при правильной эксплуатации ЭДО не может.



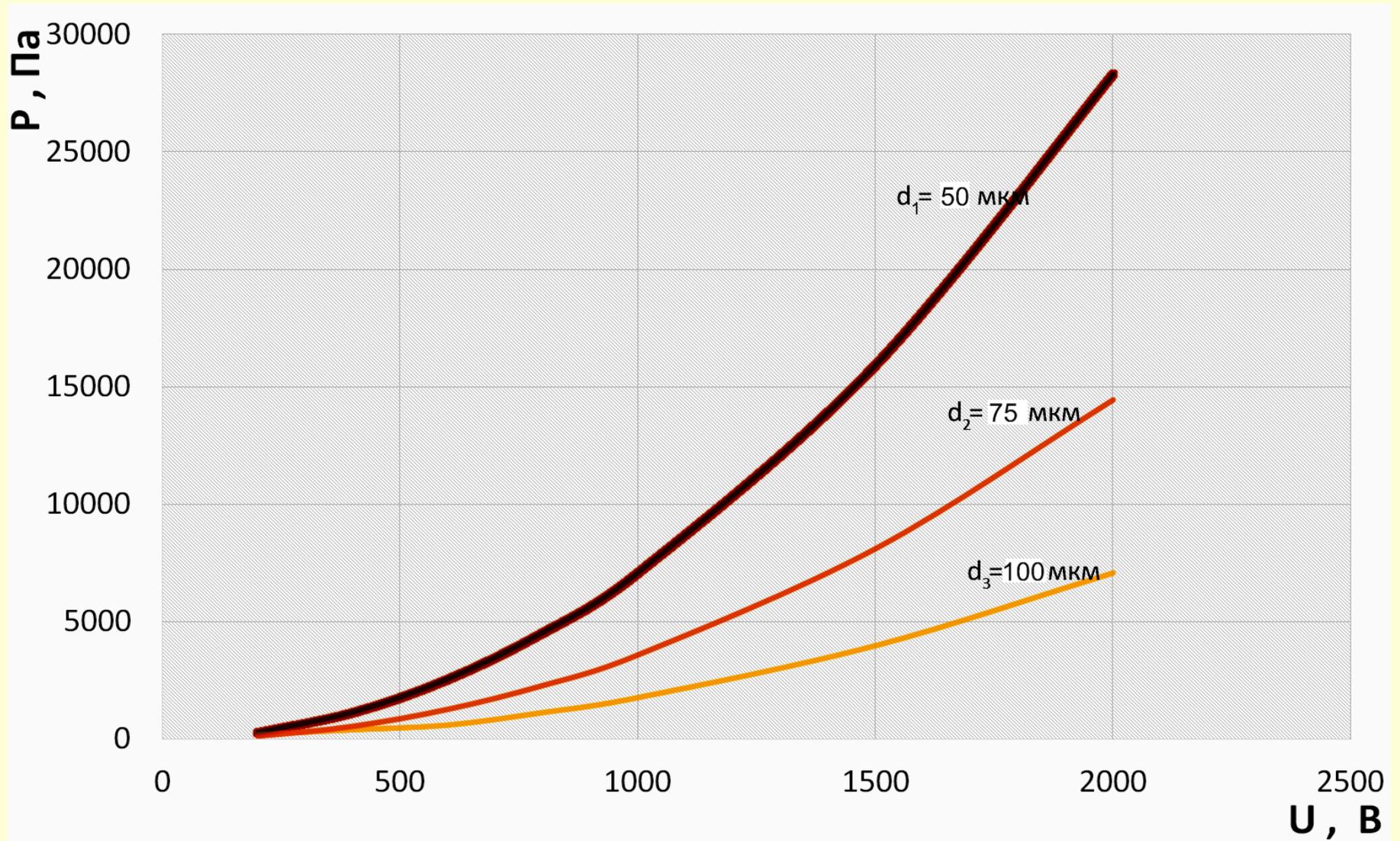
ЭДО на выставке

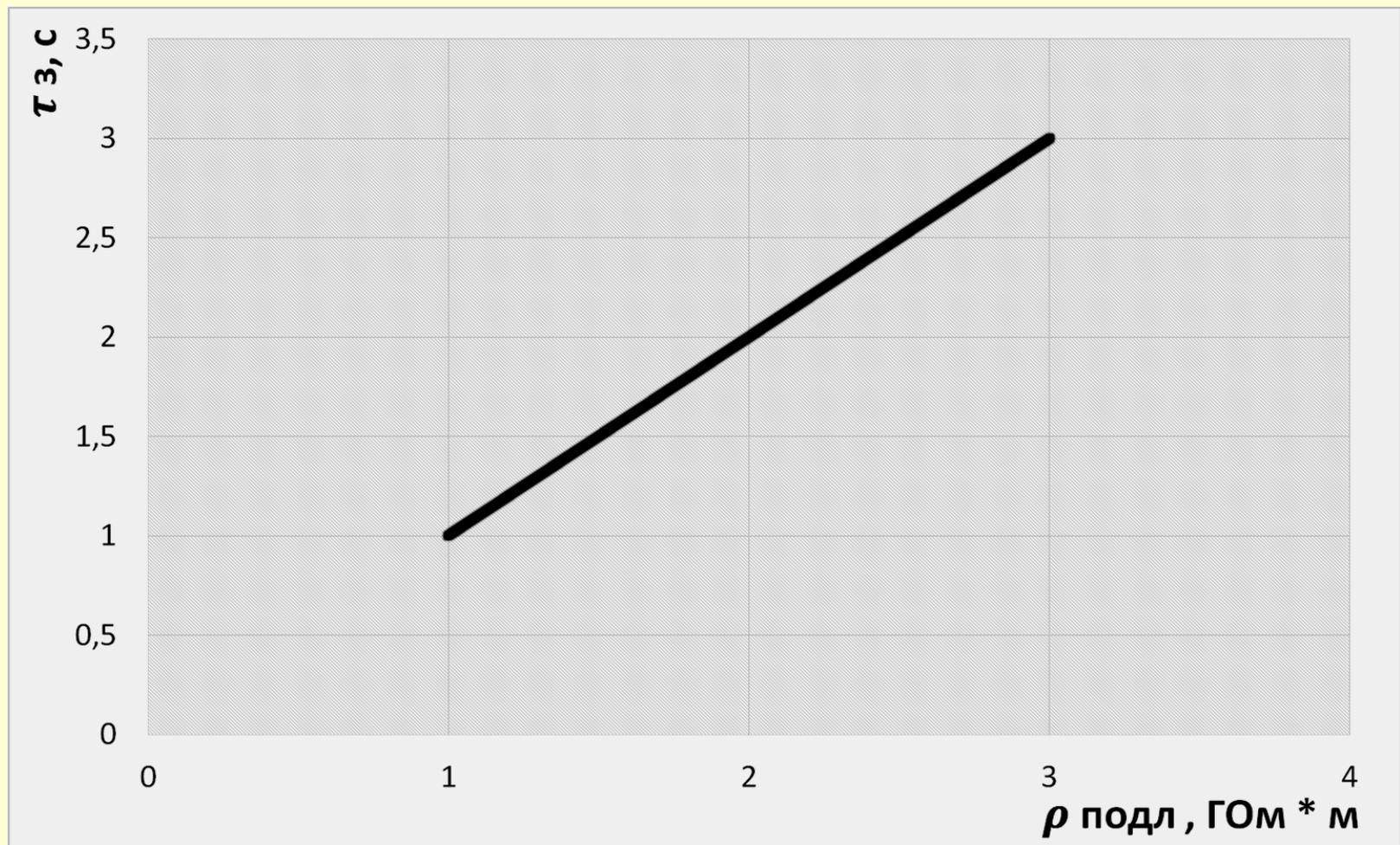




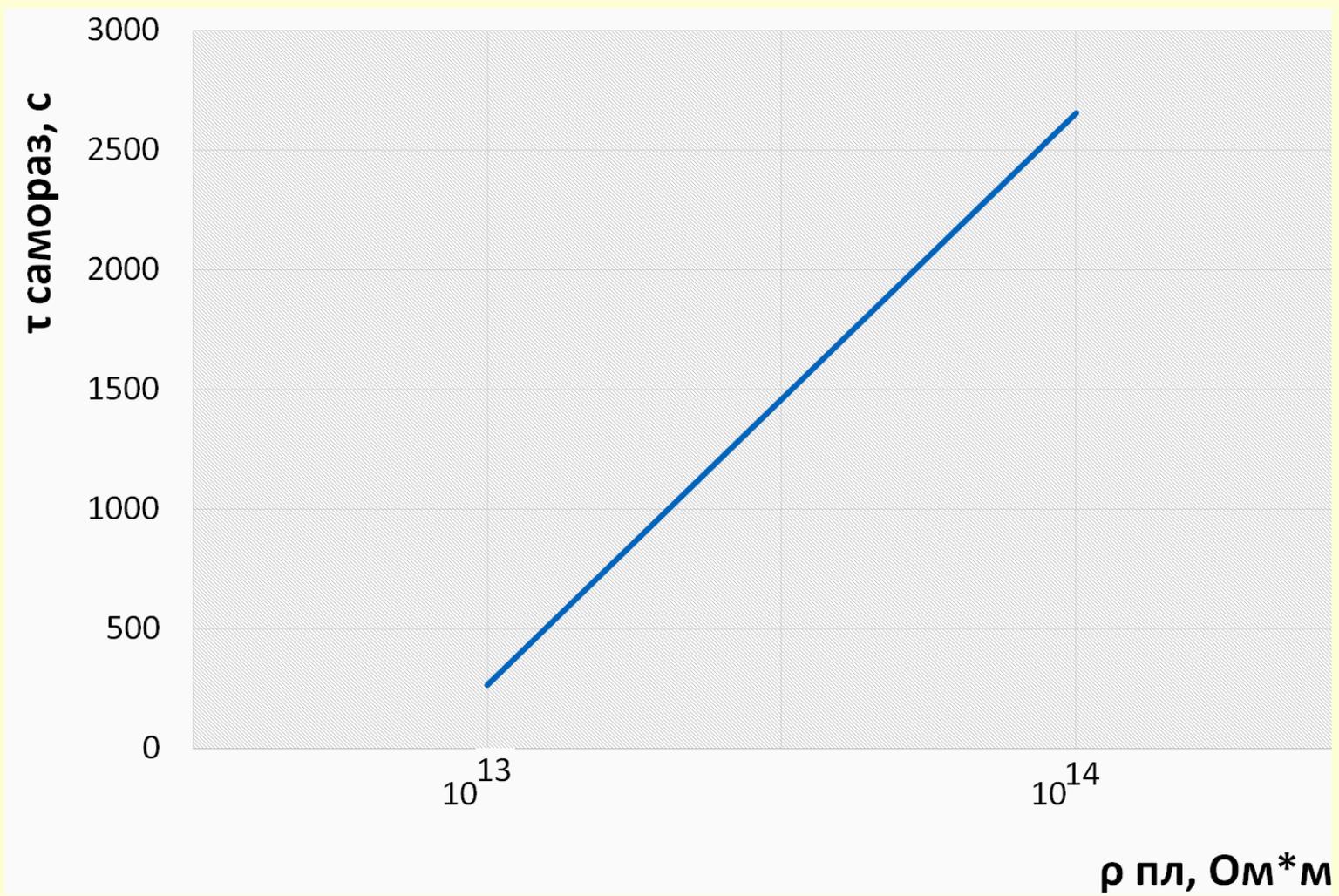
Зависимость пондеромоторного давления, закрепляющего лист, от величины напряжения при различных толщинах пленки d .

$$\varepsilon = 4$$





Зависимость времени закрепления листа от удельного сопротивления подложки. $\varepsilon = 4$, $\frac{d_{\text{подл}}}{d} = 28,2$ (например, при толщине пленки $d = 100 \text{ мкм}$ толщина подложки $d_{\text{подл}} = 2,8 \text{ мм}$).



Зависимость времени саморазряда от удельного сопротивления пленки

Электростатическое управляемое закрепление листового материала



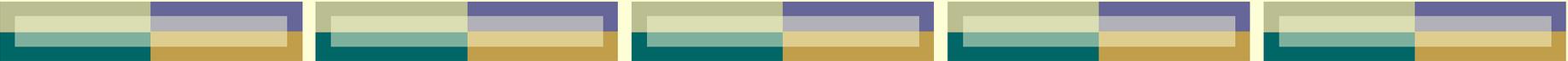
ЭДО с экономным батарейным питанием



ЭДО дома







4. Измерения
электрофизических
характеристик материалов и
структур в электрических
полях: информативность
измерений, электрические
схемы и программы



Датчик на основе планарного конденсатора

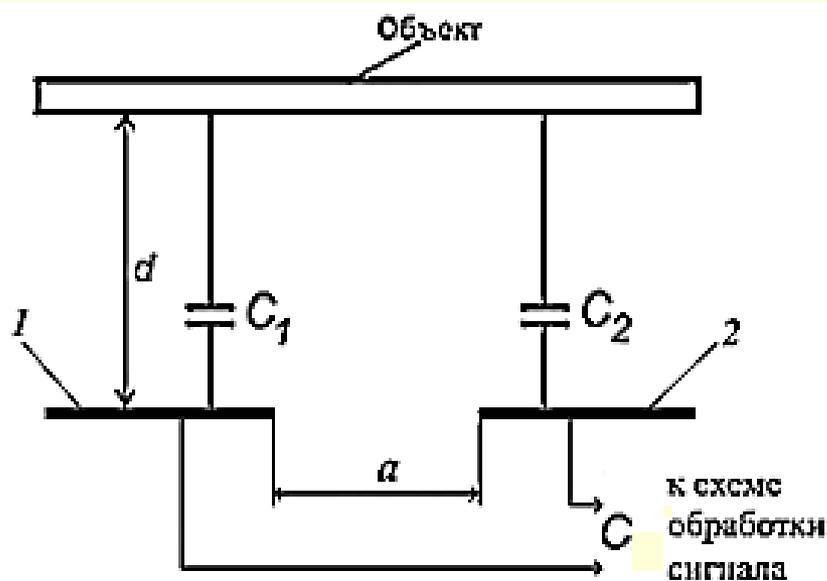
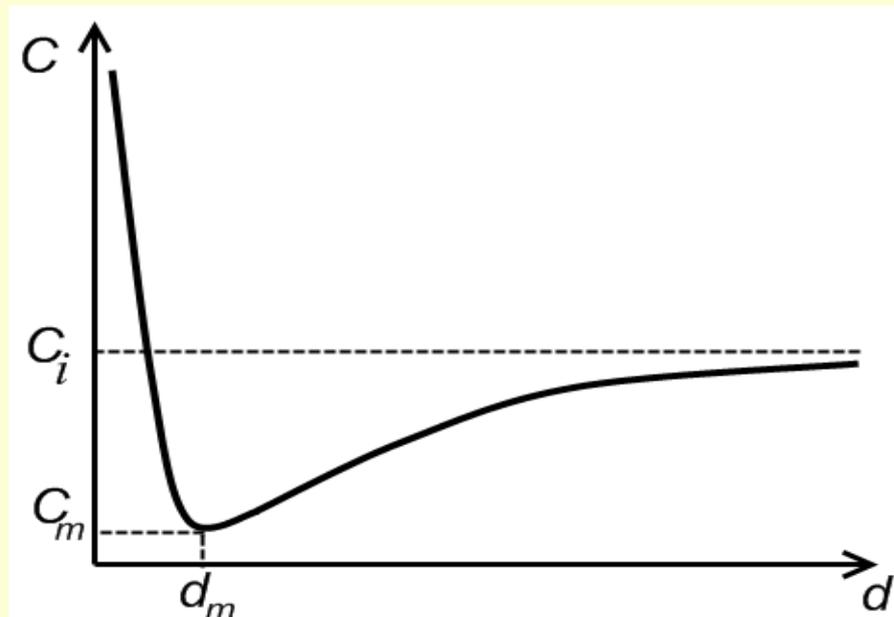
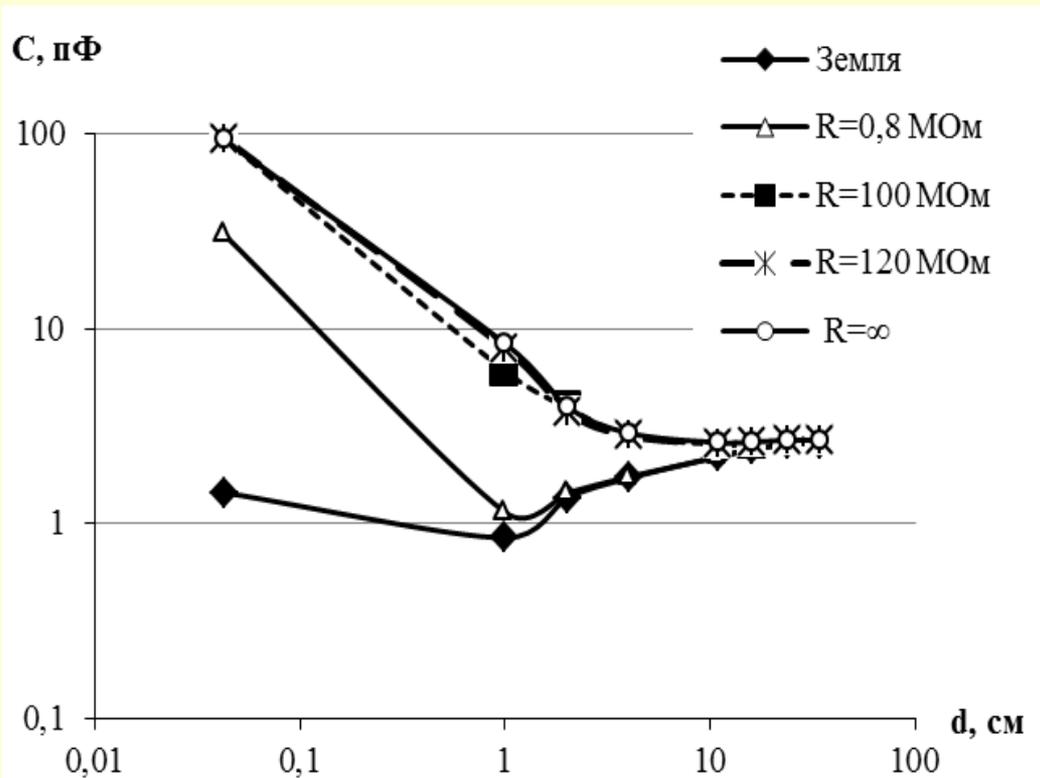


Схема емкостного датчика на основе планарного конденсатора и модель для объяснения зависимости емкости от расстояния до «наблюдаемого» объекта при малых расстояниях. 1, 2 – планарные электроды.

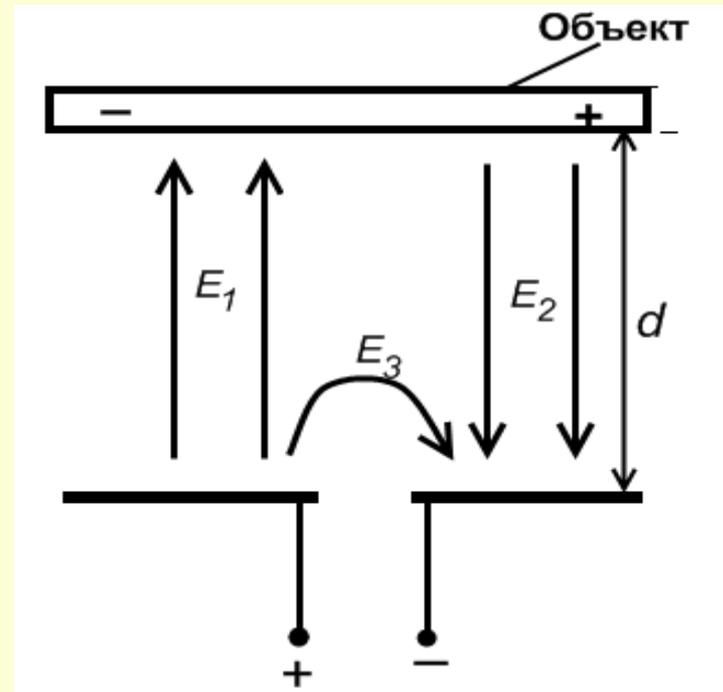


Зависимость емкости C чувствительного элемента датчика от расстояния d между «наблюдаемым» объектом и поверхностью чувствительного элемента датчика.

C_i – собственная емкость датчика – емкость планарных электродов при отсутствии вблизи них возмущающего объекта

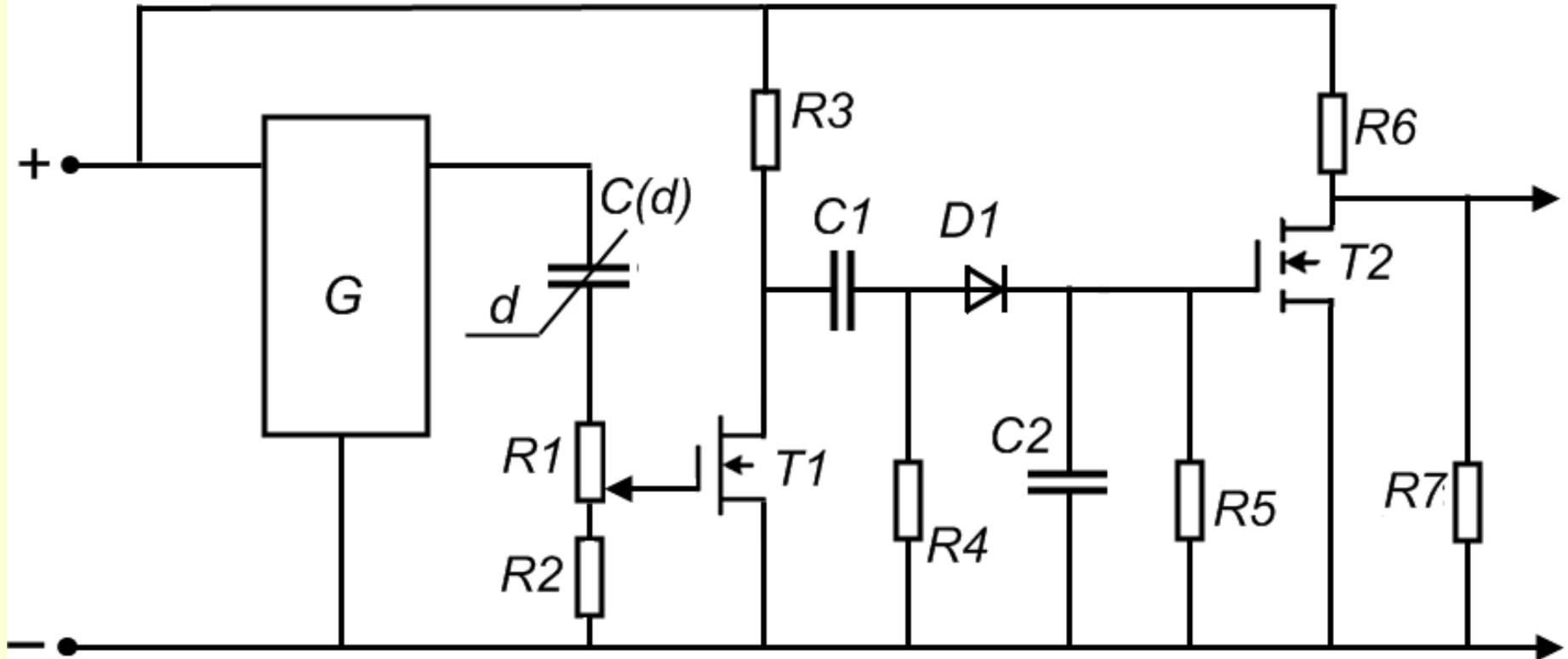


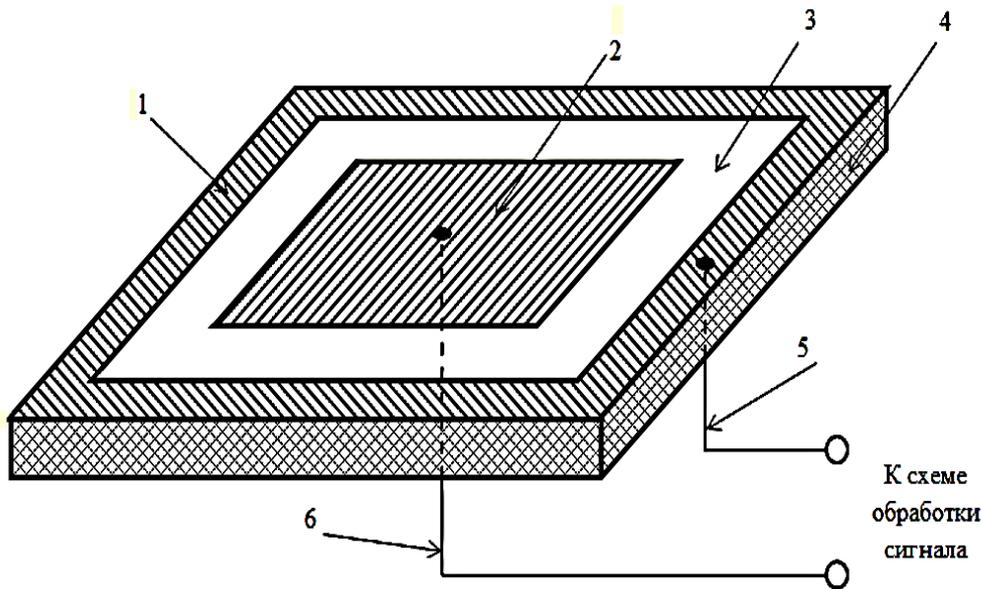
Экспериментальные зависимости емкости C чувствительного элемента датчика от расстояния между «наблюдаемым» электропроводящим объектом и поверхностью чувствительного элемента планарного датчика. R – сопротивление между объектом и заземлением. Зазор между электродами $a=20$ мм.



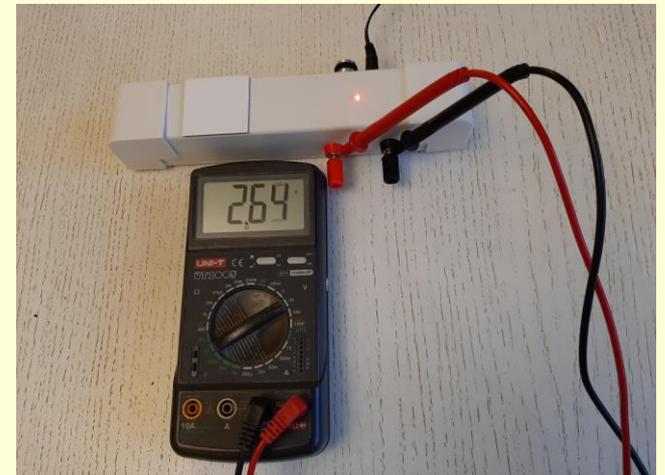
. Модель для объяснения зависимости емкости C от расстояния до «наблюдаемого» объекта при больших расстояниях

Схемотехническая реализация планарного емкостного датчика



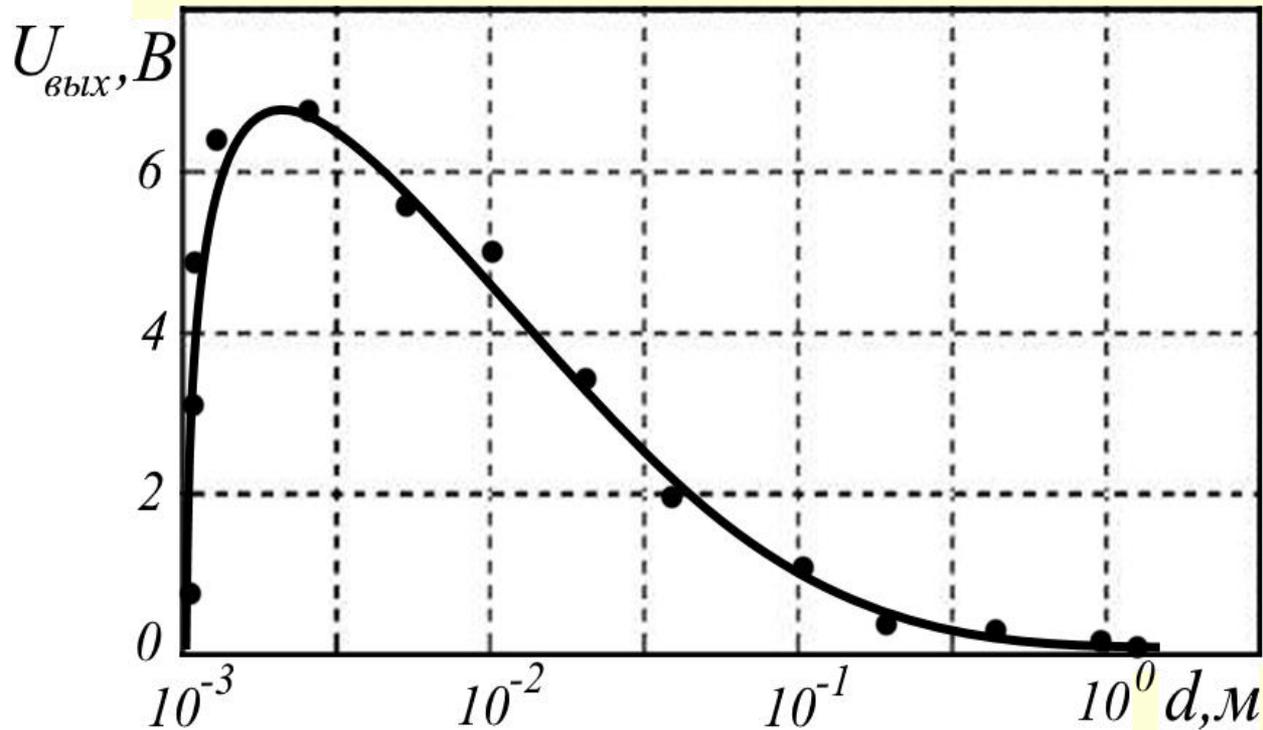


К схеме
обработки
сигнала



Чувствительный элемент емкостного датчика. 1, 2 – планарные электроды, 3 -изолирующий зазор между электродами, 4- стеклотекстолитовая плата, 5, 6 - проводные выводы

Макетный образец



Зависимость выходного сигнала датчика от расстояния до металлической пластины

1.

Использование «дальнодействующего» участка зависимости емкости от расстояния.

Изучалась возможность применения разработанного устройства в качестве датчика приближения. Измерялся выходной сигнал при опускании горизонтальной металлической пластины размером 20x20 см к датчику.

Количество пленок	$U_{\text{вых1}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{вых2}}, \text{ мВ}$
0	638	2200
1	340	1550
2	100	1200
3	26,3	976
4	19,6	722
5	16,3	536

2. Использование «короткодействующего» участка зависимости емкости от расстояния.

2.1. С помощью датчика «подсчитывалось» количество лавсановых пленок толщиной 20 мкм, имеющих те же размеры, что и чувствительный элемент датчика (4x4 см). Пленки клали непосредственно на поверхность чувствительного элемента. В таблице приведены измеренные при двух различных напряжениях питания значения выходных сигналов датчика как функция количества положенных друг на друга пленок.

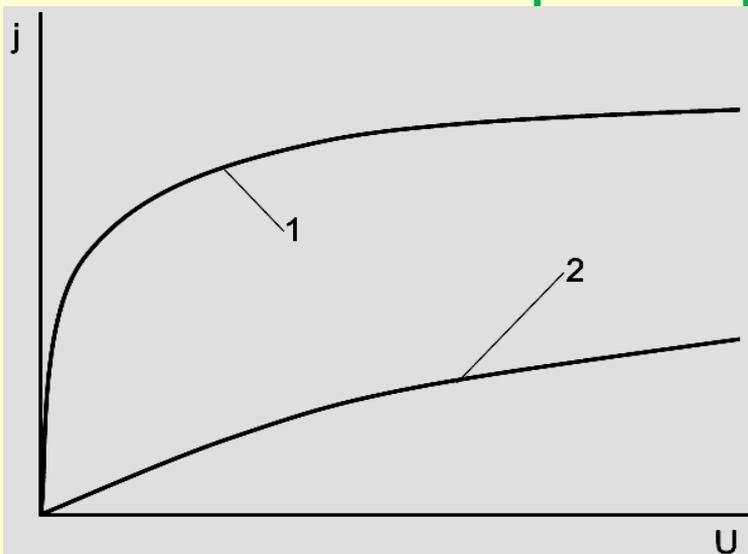
№ эксперимента	Масло подсолнечное «Золотая семечка» $U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$	Масло подсолнечное «Ставрополье» $U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$	Масло оливковое «Carbonell» $U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$
1	257	186	226
2	255	187	236
3	236	183	230
4	243	178	230
Среднее	252	184	230

2. Использование «короткодействующего» участка зависимости емкости от расстояния.

2.2. С помощью датчика выявлялись различия в электрофизических характеристиках двух сортов подсолнечного масла и оливкового масла.

Тонкая пленочная полимерная кювета заполнялась во всех случаях одинаковым количеством того или иного масла, отмерявшегося с помощью медицинского шприца (использовалось 7,5 мл).

Контроль качества диэлектрических материалов на основе измерения их статических и низкочастотных параметров и характеристик



$$j = AU^n$$

$$\frac{I_{\text{деф}}}{I_{\text{общ}}} = \frac{A_1 U^{n_1} S_{\text{деф}}}{A_1 U^{n_1} S_{\text{деф}} + A_2 U^{n_2} (S_{\text{общ}} - S_{\text{деф}})}$$

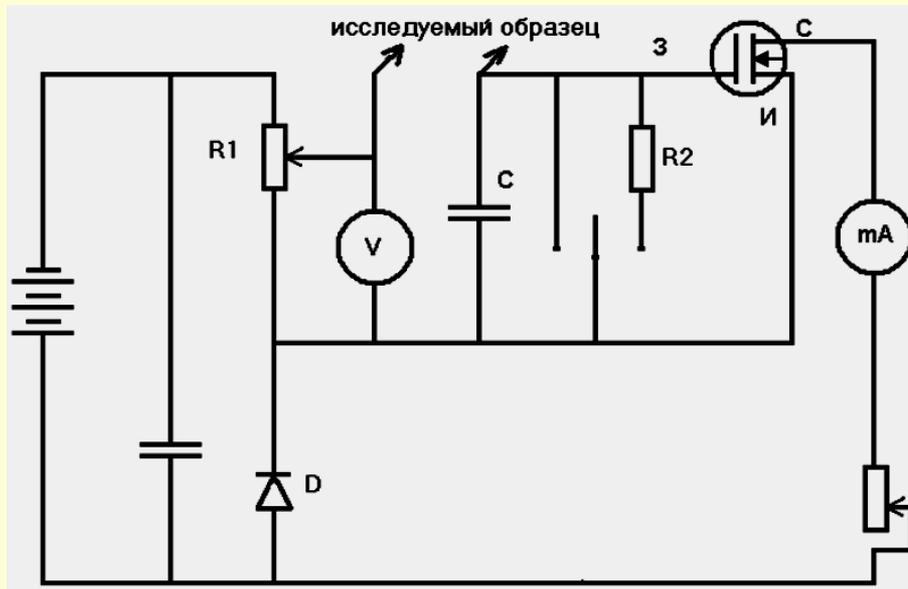
Зависимости плотности тока в диэлектрическом слое от электрического напряжения на нем. 1 – в области дефекта с повышенной проводимостью, 2 – через слой диэлектрика, не содержащий дефектов.

$$\frac{I_{\text{деф}}}{I_{\text{общ}}} = \frac{1}{1 + BU^m}$$

Для выявления потенциально опасных дефектов, токовые измерения следует проводить, во-первых, на постоянном напряжении, а во-вторых – при малых напряжениях, т.е. в слабых ЭП. На практике ситуация с имеющимися измерительными приборами, как правило, прямо противоположна

Контроль электрической емкости и сопротивления высокоомных изделий на основе использования медленных переходных процессов перераспределения электрических полей в металлодиэлектрических структурах

$$\begin{cases} \frac{U_{обр}}{R_{обр}} + C_{обр} \frac{dU_{обр}}{dt} = \frac{U_{тр}}{R_{тр}} + C \frac{dU_{тр}}{dt} \\ U_{тр} + U_{обр} = U \end{cases}$$



$$U_{тр} = \left(U - \left[\left(\frac{C}{C + C_{обр}} - \frac{R_{обр}}{R_{тр} + R_{обр}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{t(R_{тр} + R_{обр})}{(C + C_{обр})R_{тр}R_{обр}} \right) + \frac{R_{обр}}{R_{тр} + R_{обр}} \right] U \right)$$



Определение диэлектрической проницаемости и удельного сопро...



Исходные данные:

Стр (Ф):	<input type="text" value="2,2000E-07"/>	S (м2):	<input type="text" value="0,0531"/>
Rтр (Ом):	<input type="text" value="1,3436E+11"/>	d (м):	<input type="text" value="0,01"/>
U (В):	<input type="text" value="1400"/>		
Uтр1 (В):	<input type="text" value="0,553"/>		
Uтр2 (В):	<input type="text" value="0,611"/>		
T1 (с):	<input type="text" value="0"/>		
T2 (с):	<input type="text" value="1200"/>		

Результаты:

Собр (Ф):	<input type="text" value="8,6934E-11"/>
Rобр (Ом):	<input type="text" value="9,3477E+13"/>
ε	<input type="text" value="1,8499E+00"/>
ρ (Ом м):	<input type="text" value="4,9637E+14"/>
$\Delta R_{тр}$	<input type="text" value="1,3415E+09"/>
$\Delta C_{обр}$	<input type="text" value="1,9605E-15"/>
$\Delta R_{обр}$	<input type="text" value="2,1108E+09"/>
$\Delta \rho$ (Ом м):	<input type="text" value="5,0509E+12"/>
$\Delta \varepsilon$	<input type="text" value="1,8824E-02"/>

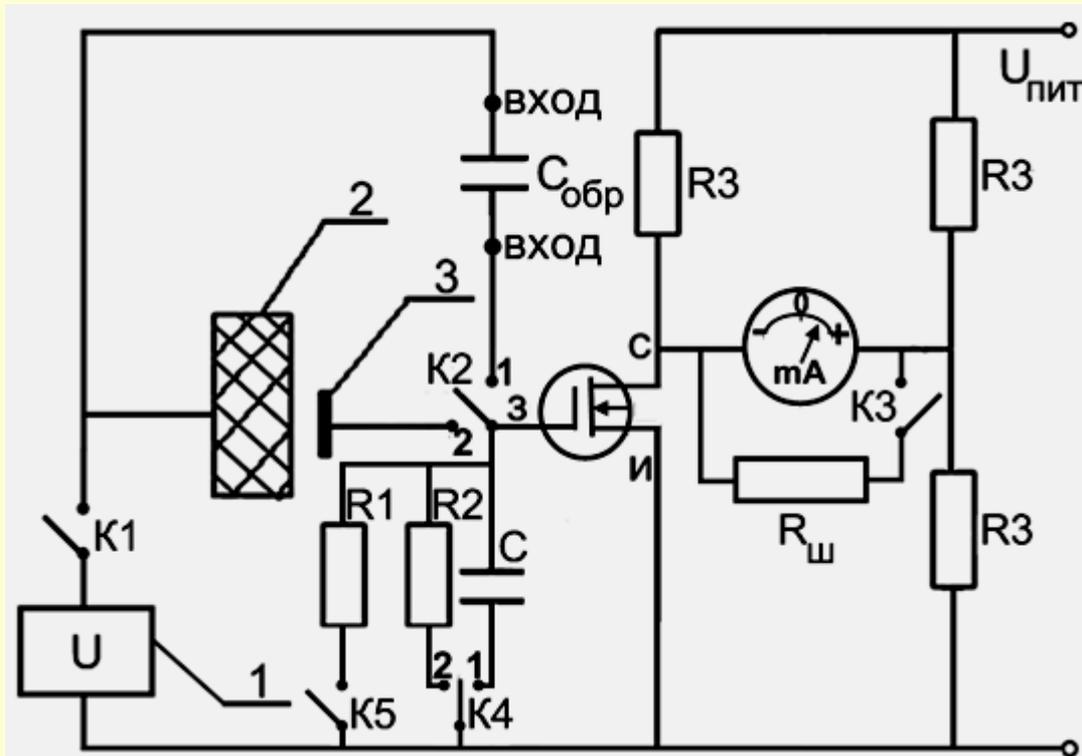
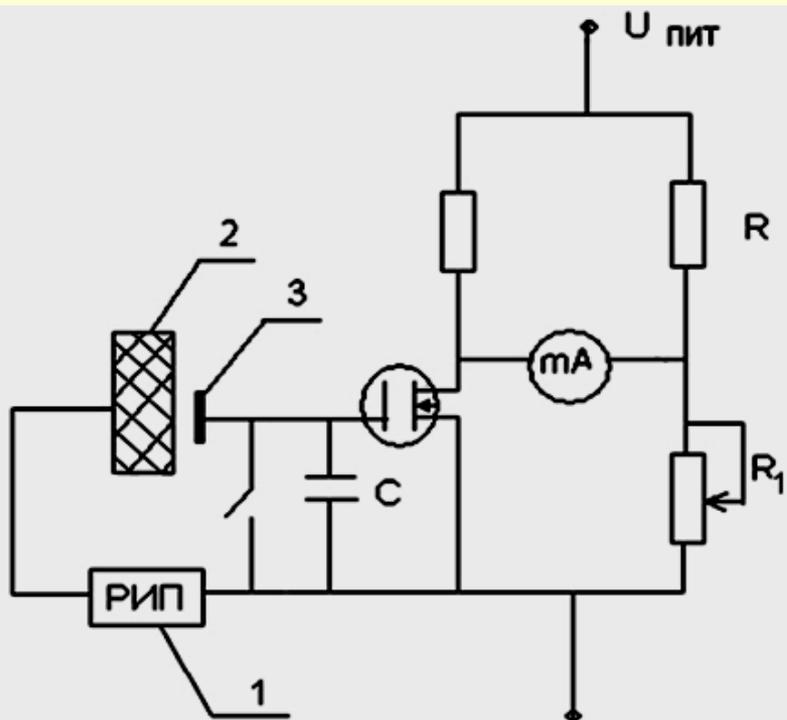
Погрешности прямых измерений:

ΔT (с):	<input type="text" value="1,0000E+00"/>
ΔU (В):	<input type="text" value="1,0000E+00"/>
$\Delta U_{тр}$ (В):	<input type="text" value="1,0000E-03"/>
Δd (м):	<input type="text" value="1,0000E-04"/>
ΔS (м2):	<input type="text" value="1,0000E-04"/>

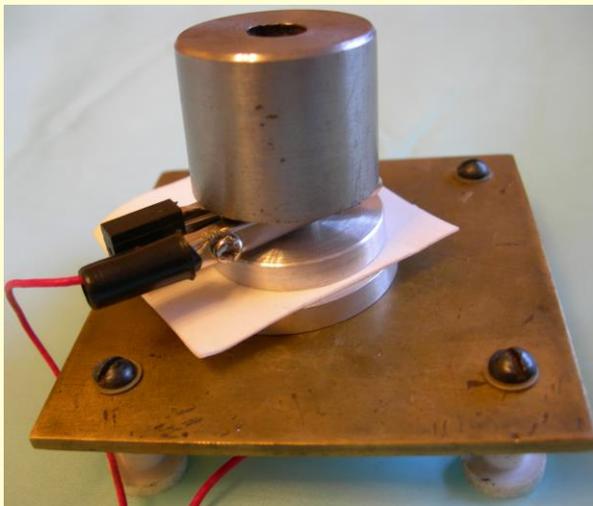
Предполагаемый диапазон значений:

Rобр (Ом): от	<input type="text" value="1,0000E+10"/>	до	<input type="text" value="1,0000E+15"/>
Собр (Ом): от	<input type="text" value="1,0000E-12"/>	до	<input type="text" value="1,0000E-08"/>

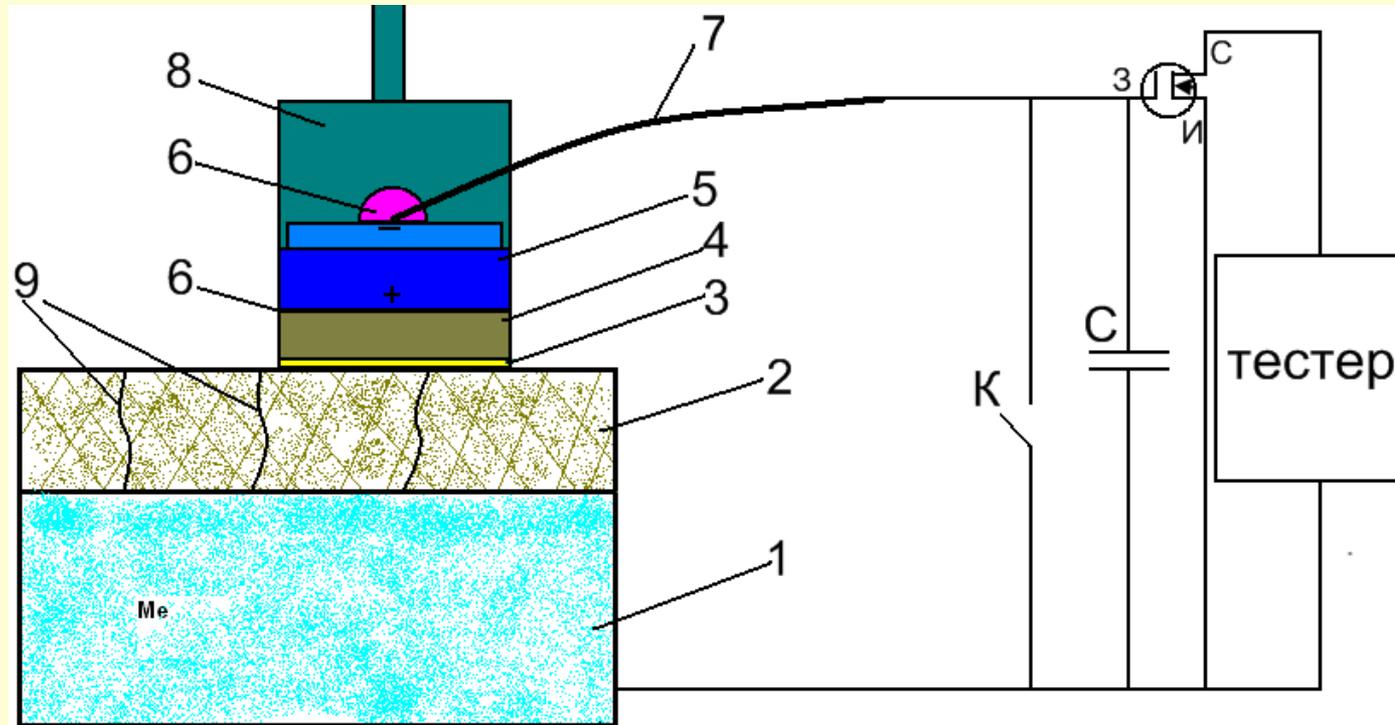
Использование полевых транзисторов для контроля поверхностного потенциала (заряда) диэлектриков



Внешний вид измерительных средств

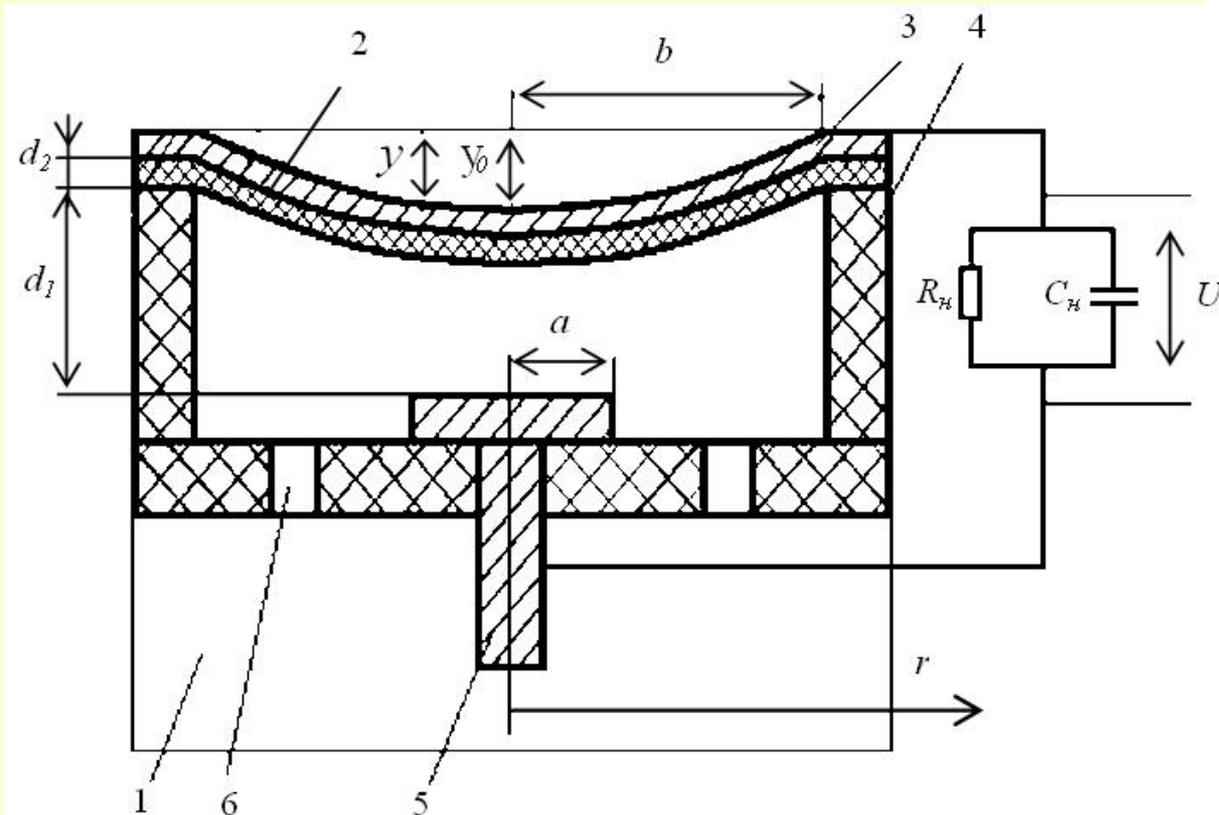


Упрощенная диагностика наличия сквозных пор



Методика контроля диэлектрических покрытий электростатическим методом. 1 - металлическое основание, 2 – диэлектрическое покрытие, 3 – влажная бумага, 4 - проводящая резинка, 5 – батарейка, 6 – контактол, 7 - медная проволока, 8 - диэлектрическая ручка, 9 – дефект.

Неразрушающий контроль конденсаторных структур с подвижными обкладками



$$y = y_0 \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right)$$

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016610272

Программа для контроля параметров емкостных структур
методом вольт-фарядных характеристик

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (RU)*

Авторы: *Ахкурин Тимур Рашидович (RU), Пецлюк Николай Сергеевич (RU), Водкайло Екатерина Габриэловна (RU)*

Заявка № 2015660773

Дата поступления 10 ноября 2015 г.

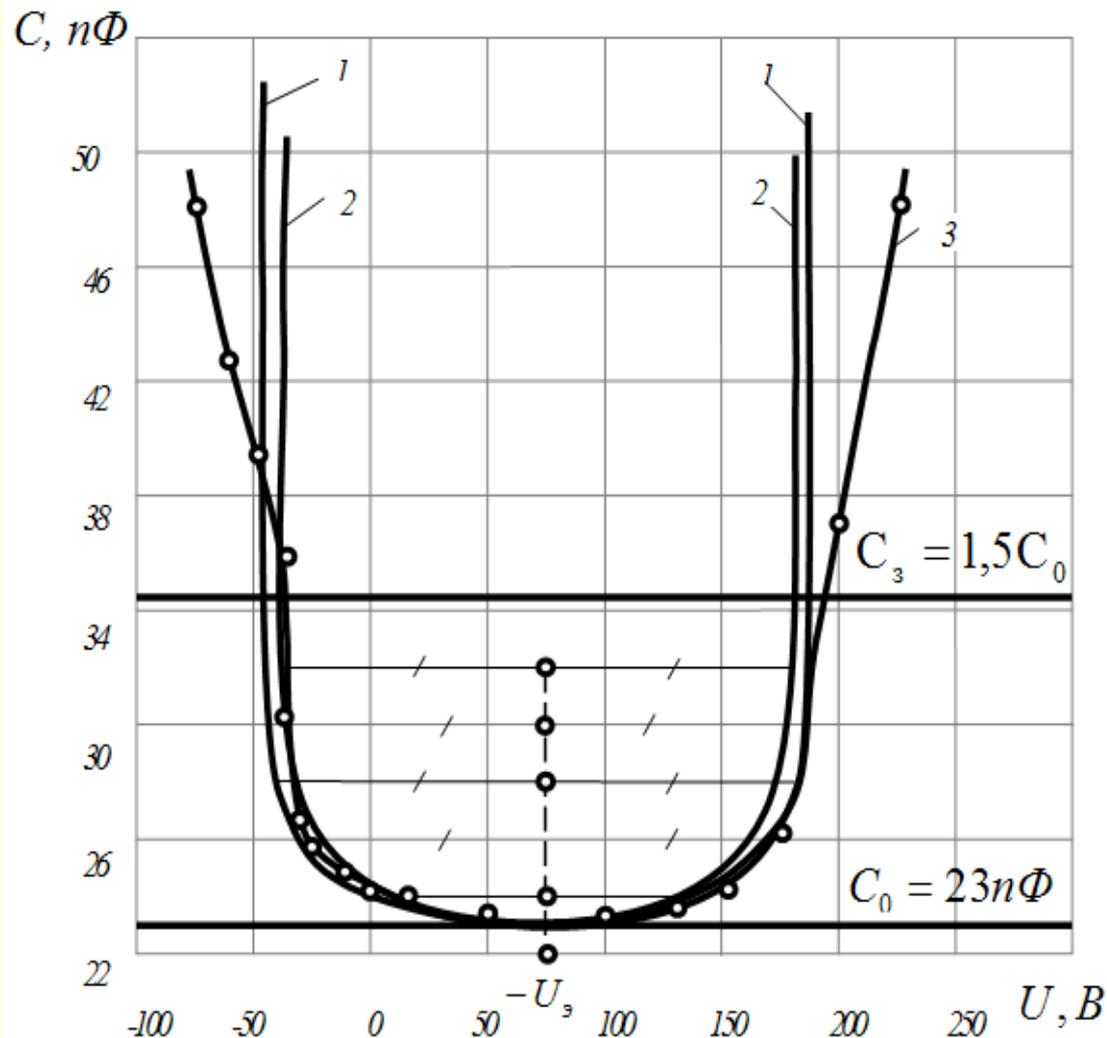
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налиев Г.П. Налиев



Метод ВФХ для контроля конденсаторных структур с подвижными обкладками

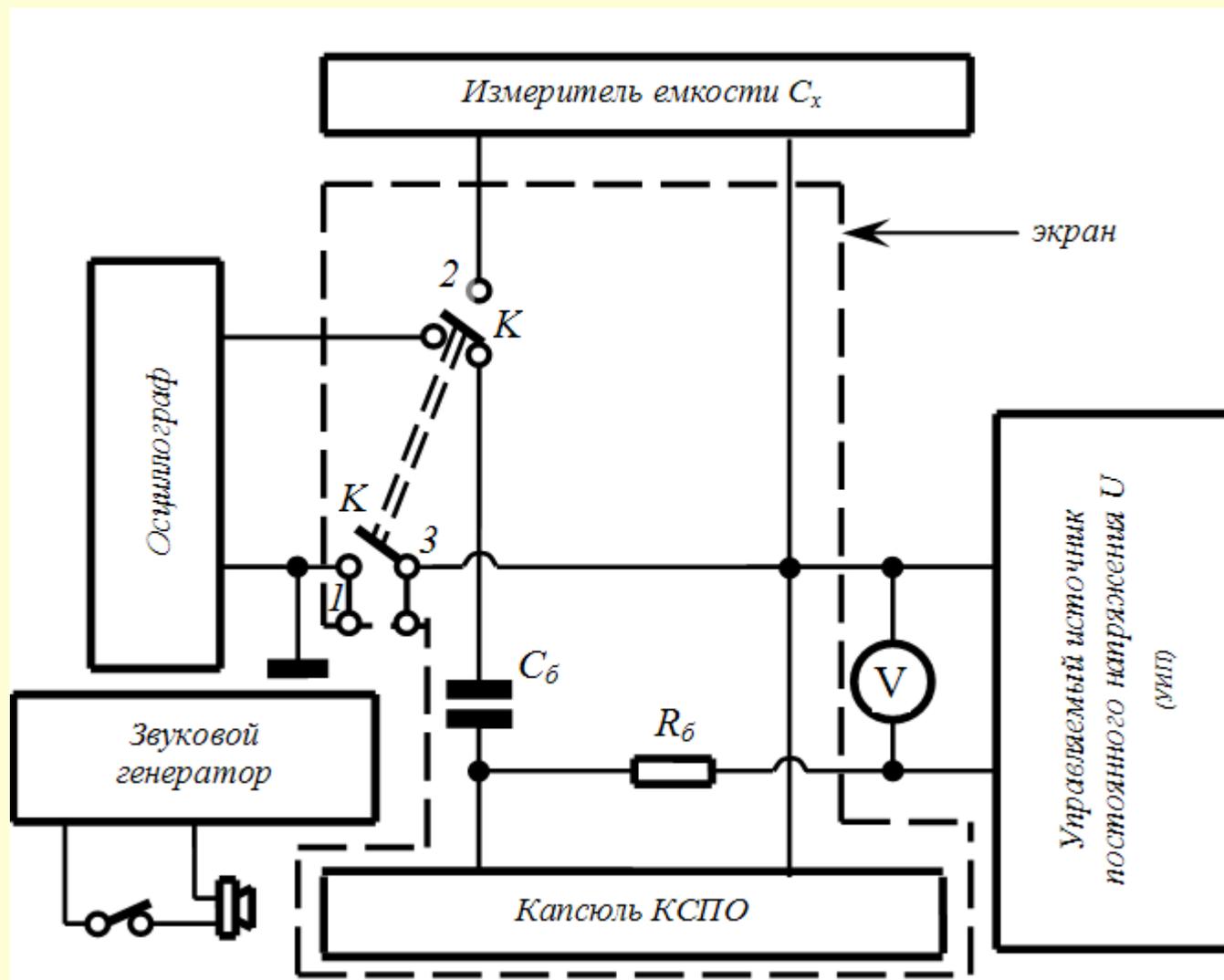


$$C = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \pi a^2}{y_0 d_2} \ln \left[1 + \frac{a^2 y_0}{b^2 (d_1 - y_0)} \right]}{\frac{\varepsilon_1}{y_0} \ln \left[1 + \frac{a^2 y_0}{b^2 (d_1 - y_0)} \right] + \frac{a^2 \varepsilon_2}{b^2 d_2}}$$

$$4\varepsilon_2^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_0^3 - 4\varepsilon_2 A \left(2 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_0^2 + 4A^2 y_0 - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_{\dot{Y}} + U)^2 a^2}{2\tau} = 0$$

Вольт-фарадная характеристика конденсаторной структуры с подвижными обкладками

Схема неразрушающего контроля конденсаторных структур с подвижными обкладками (КСПО)

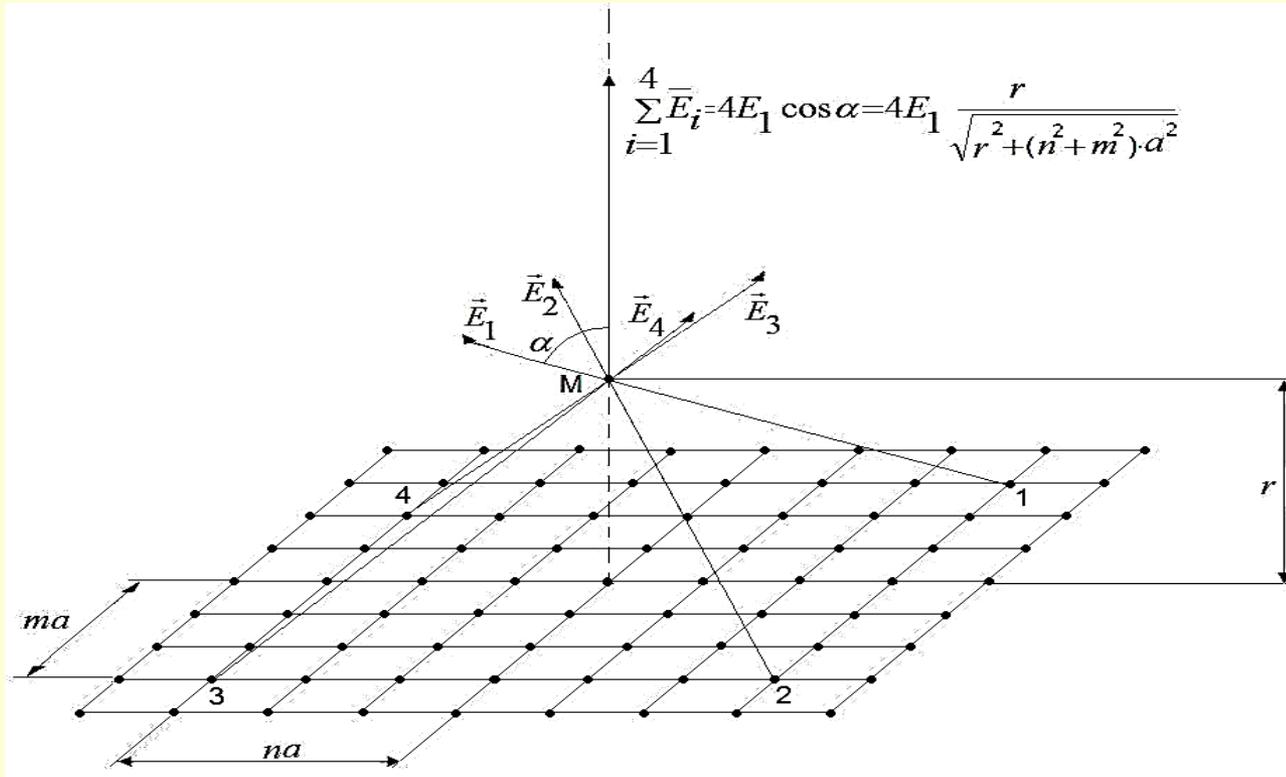




5. Особенности
электрических полей при
использовании микро- и
наноразмерных
межэлектродных
промежутков

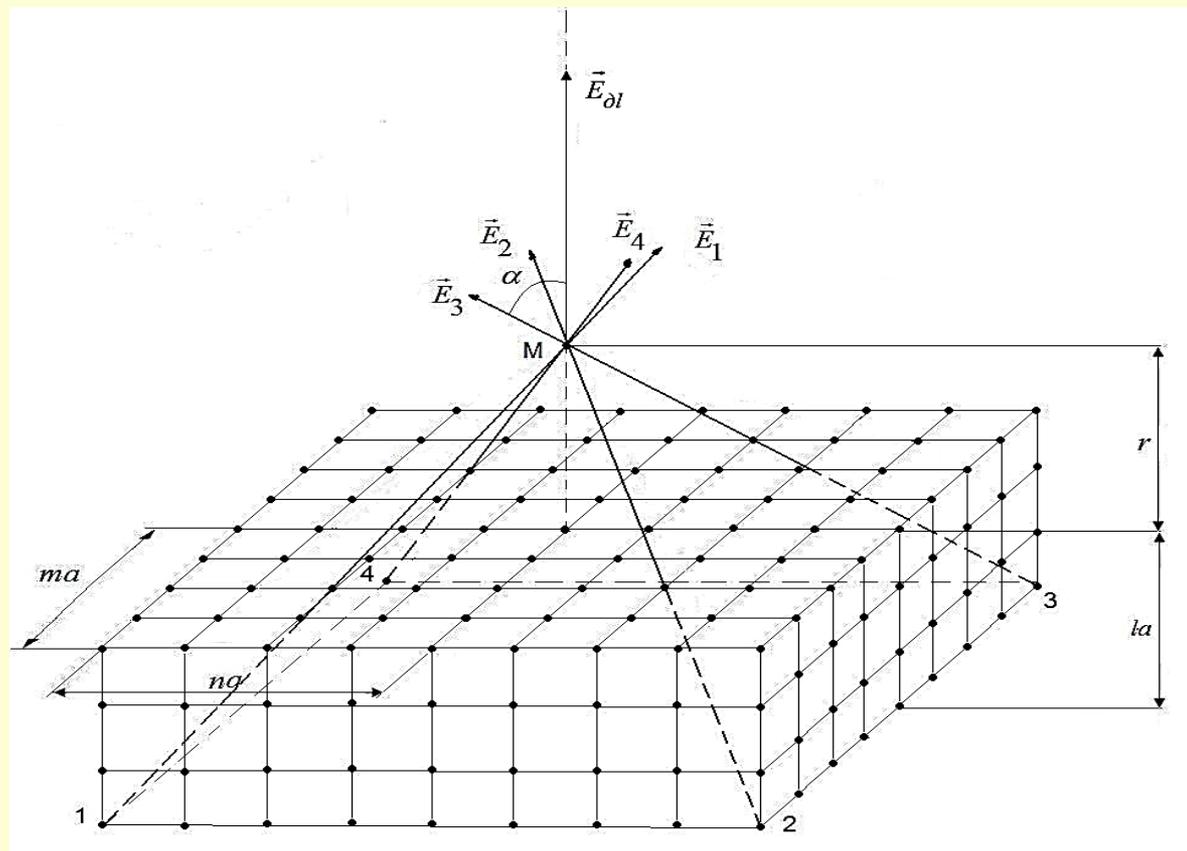


Выясним, на каких расстояниях между плоскостями формула для напряженности электрического поля плоского конденсатора не будет адекватно отражать реальную физическую ситуацию. Рассмотрим для примера равномерно заряженную плоскость с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-4}$ Кл. Как известно, напряженность электрического поля, создаваемая ей в вакууме ($\varepsilon = 1$), будет равна $E_H = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon} = 5,65 \cdot 10^6$ В/м. Именно такие по порядку величины напряженности электрических полей и используются при получении электроадгезионных соединений. Указанному значению σ , очевидно, соответствует $N = \frac{\sigma}{e} = 6,25 \cdot 10^{14}$ элементарных зарядов, приходящихся на 1 м^2 площади. Следовательно, среднее расстояние между ними будет $a = \frac{1}{\sqrt{N}} = 4 \cdot 10^{-8}$ м. Таким образом, при расстояниях между плоскостями двойного электрического слоя, соответствующему по порядку величины десятым долям мкм, классическая формула может давать не соответствующие действительности значения. Отметим, что именно указанные выше расстояния между зарядами используются в процессе получения электроадгезионных соединений, т. к. зазор между соединяемыми деталями обусловлен, в основном, шероховатостью соединяемых поверхностей, которые обычно обрабатывают не хуже, чем по 11-му классу чистоты.



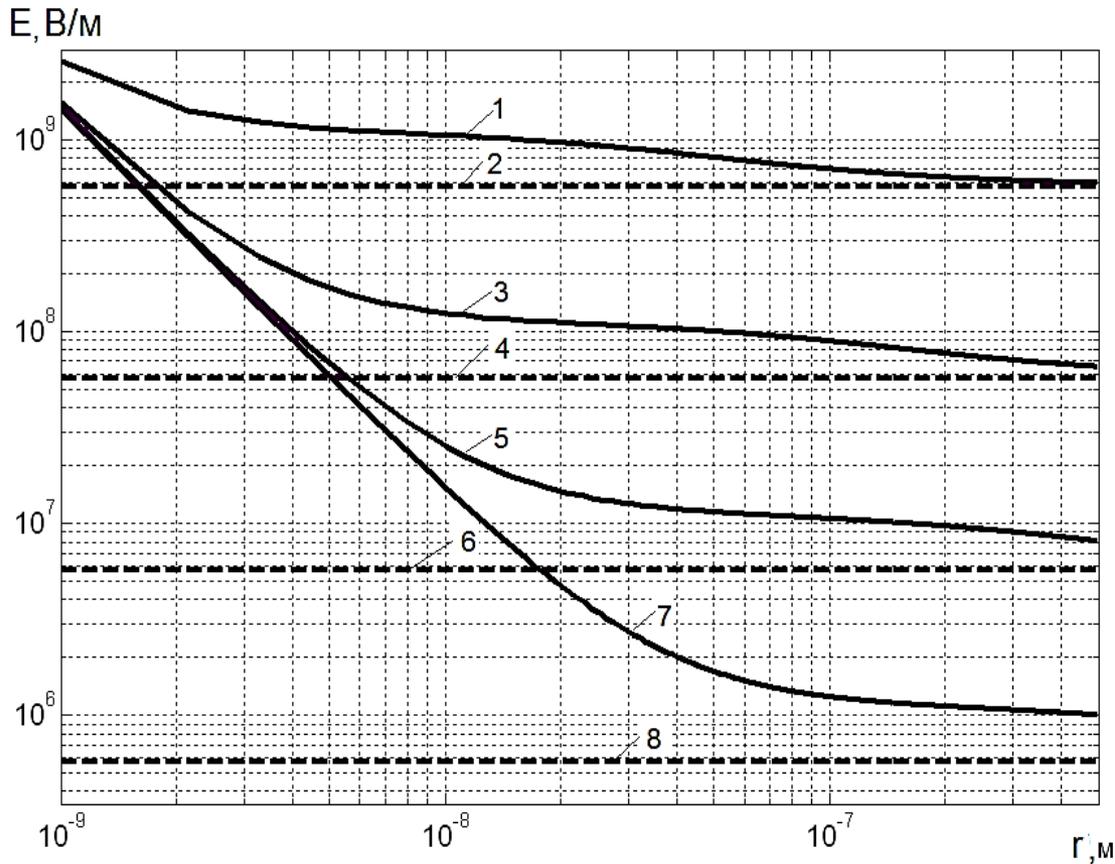
Модель плоскости с прерывистым распределением зарядов (a – расстояние между зарядами). В качестве пояснения изображено несколько векторов напряженности и их результирующая.

$$E_{\partial} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{4r}{(r^2 + a^2(m^2 + n^2))^{3/2}} \right) + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1}{\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{r}{\left(r^2 + \frac{q_1}{\sigma}(m^2 + n^2)\right)^{3/2}} \right) + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$$

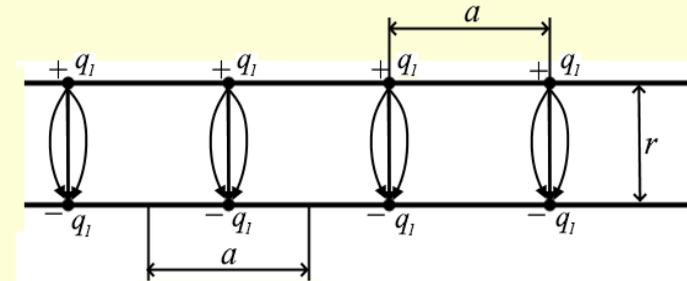


Модель с прерывистым распределением зарядов в слое небольшой толщины. В качестве пояснения изображено несколько векторов напряженности и их результирующая.

$$\begin{aligned}
 E_{\partial} &= \sum_{l=0}^{L-1} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{4(r+al)}{\left((r+al)^2 + a^2(m^2+n^2) \right)^{3/2}} + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon(r+al)^2} \right) = \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_1}{\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{\left(r + \sqrt{\frac{q_1}{\sigma}} l \right)}{\left(\left(r + \sqrt{\frac{q_1}{\sigma}} l \right)^2 + \frac{q_1}{\sigma}(m^2+n^2) \right)^{3/2}} + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon \left(r + \sqrt{\frac{q_1}{\sigma}} l \right)^2} \right)
 \end{aligned}$$



$$E_{\partial} \approx \frac{2}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{r\sqrt{\sigma}}{\sqrt{q_1}} \right) + \frac{\pi\sqrt{q_1}}{2r\sqrt{\sigma}} \right] E_H$$



$$E_H = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$$

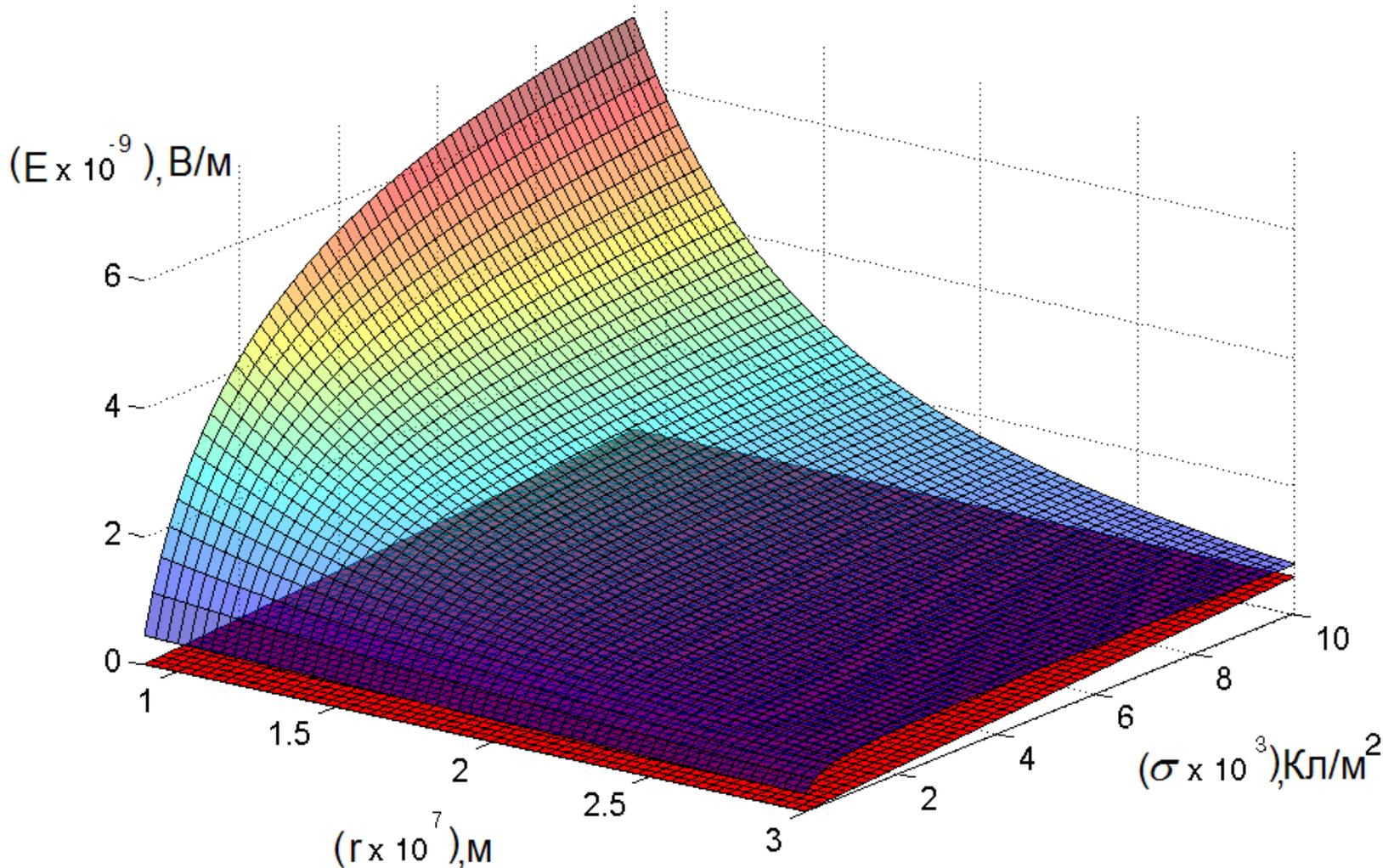
Зависимости напряженностей электростатического поля от расстояния до плоскости при различных параметрах

1 – $E_{\partial}, \sigma = 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$; $a = 4 \text{ нм}$; 2 – $E_H, \sigma = 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$; $a = 4 \text{ нм}$; 3 – $E_{\partial}, \sigma = 10^{-3} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,04 \text{ мкм}$;

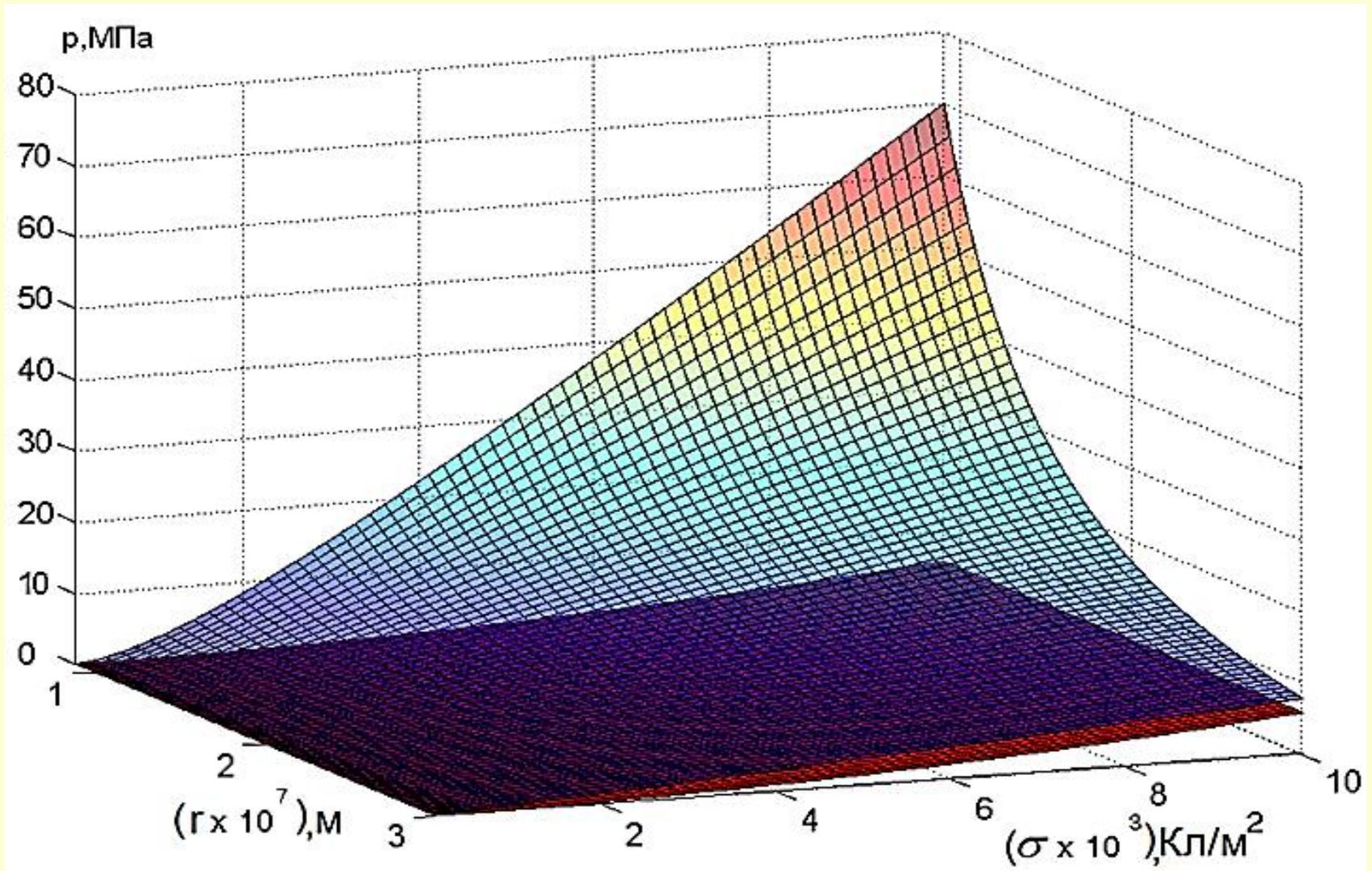
4 – $E_H, \sigma = 10^{-3} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,04 \text{ мкм}$; 5 – $E_{\partial}, \sigma = 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,13 \text{ мкм}$;

6 – $E_H, \sigma = 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,13 \text{ мкм}$; 7 – $E_{\partial}, \sigma = 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,4 \text{ мкм}$;

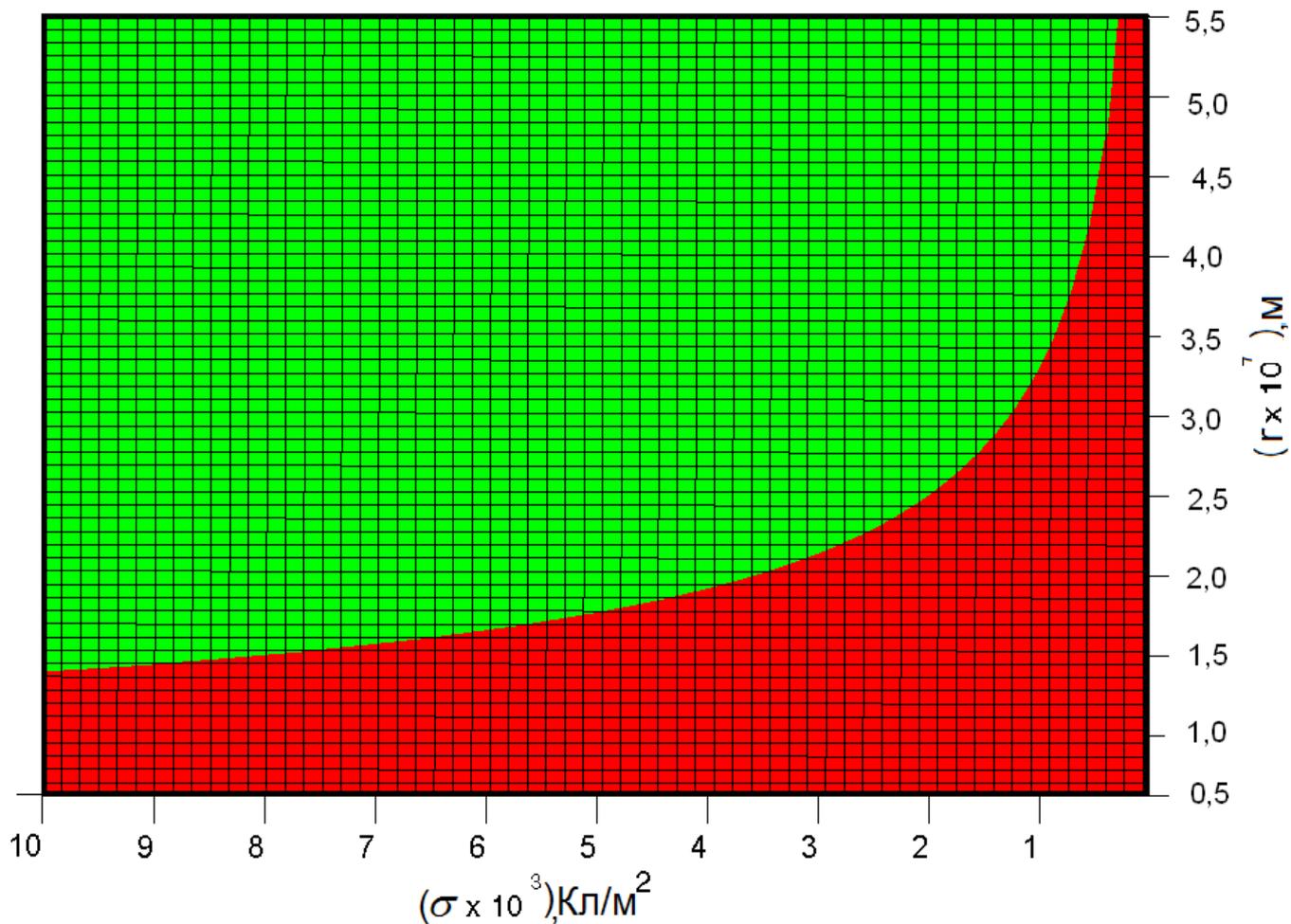
8 – $E_H, \sigma = 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$; $a = 0,4 \text{ мкм}$.



Зависимости напряженностей электростатического поля от расстояния до плоскости и поверхностной плотности заряда (плоскость отвечает непрерывному распределению заряда, криволинейная поверхность - дискретному)



Зависимости пондеромоторного давления от расстояния до плоскости и поверхностной плотности заряда. (Плоскость отвечает непрерывному распределению заряда, криволинейная поверхность - дискретному)



Границы применения классической формулы для напряженности электрического поля заряженной плоскости в случае распределения заряда в слое малой конечной толщины. Зеленое поле – относительная ошибка применения классической формулы не превышает 10%, красное – больше 10%.

Article
**Features of Electrostatic Fields and Their Force Action
 When Using Micro- and Nanosized
 Inter-Electrode Gaps**

Nikolai Pshchelko ¹ and Ekaterina Vodkailo ^{2,*} 

¹ Department of Physics, Military Telecommunication Academy named after Budienny S. M., 194064 Saint-Petersburg, Russia; nikolsp@mail.ru

² Department of Informatics and Computer Technology, Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint-Petersburg, Russia

Materials **2020**, *13*, 5669; doi:10.3390/ma13245669

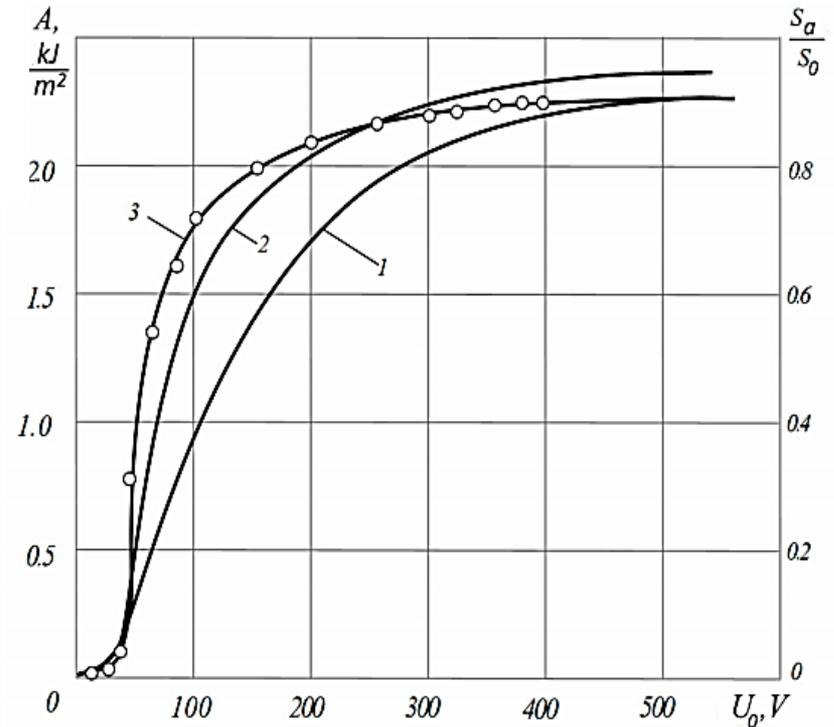
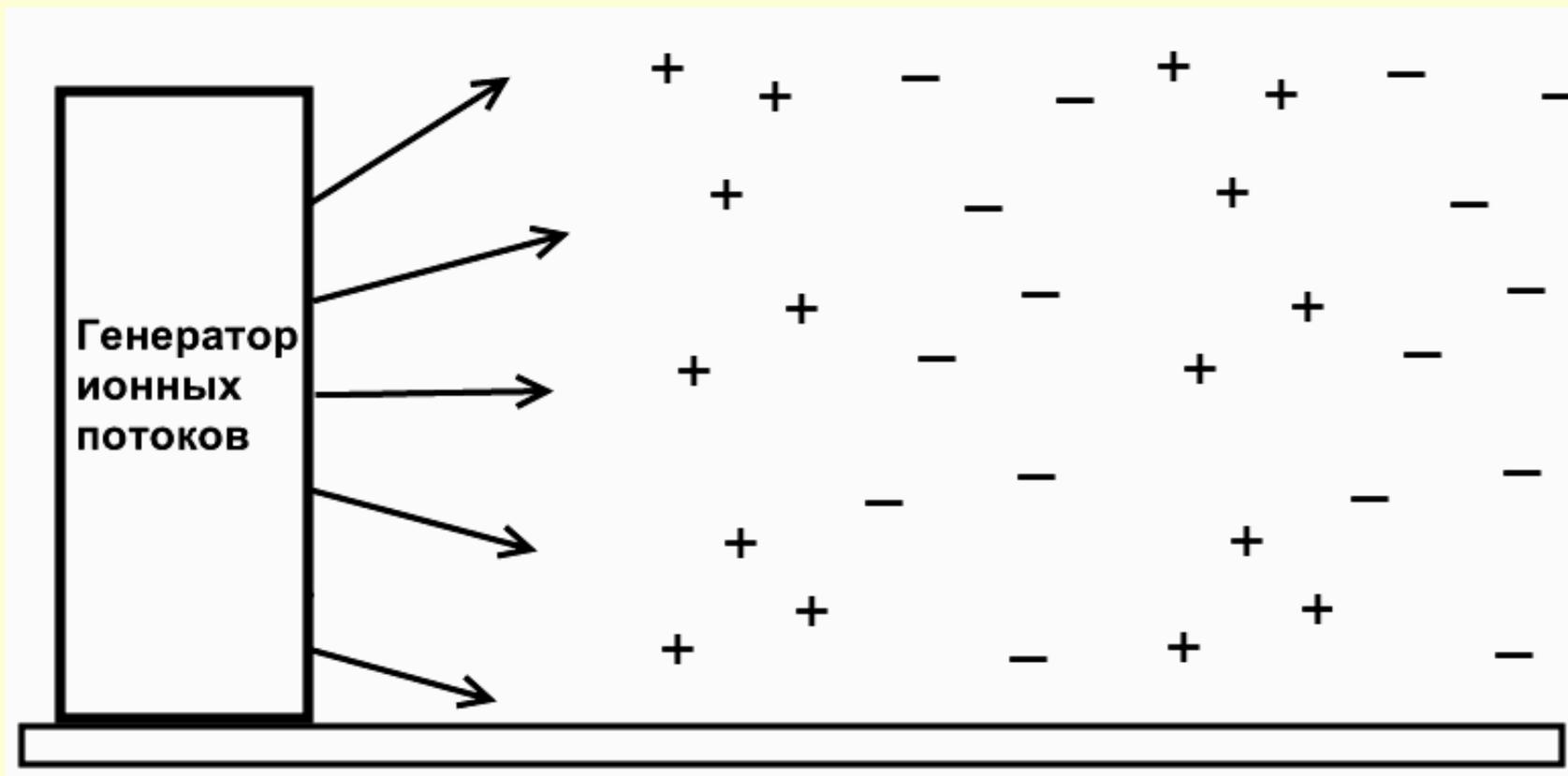


Figure 9. Experimental dependence of the strength of the electroadhesive joint aluminum foil-polished window glass (curve 3) and the calculated dependences of the actual contact relative area S_a/S_0 on the electric voltage for the same pair of materials (curves 1, 2). 1—Calculation taking into account the accumulation of space charge, in the anode region of the dielectric; 2—calculation taking into account the accumulation of space charge in the anode region of the dielectric and taking into account the discreteness of the charge distribution. $\epsilon_2 = 4.5$; $p_0 = 3.59 \times 10^6$ Pa; $\bar{d}_1 = R_z = 0.04$ μm .

Борьба со статическим электричеством



SMART NANOCOMPOSITES

Journal "Smart Nanocomposites"

New York USA
(ISSN:1949-4823)

15.03.2011



"There is a plenty of space at the bottom!"
R. Feinman

The certifying letter

The present letter certifies that Dr. *Pshchelko Nikolay*, the managing chair of the general and technical physics of St.-Petersburg State Mining Institute (technical university) is the associate editor of **Smart Nanocomposites journal** (Nova Publishers, New York), with the right of selection and reviewing of manuscripts for the publication in **Smart Nanocomposites journal**.

The letter is given out for a period of 3 years.

The editor coordinator:

Dr. Stanislav Moshkalev
Center for Semiconductor Components
State University of Campinas · UNICAMP Brasil

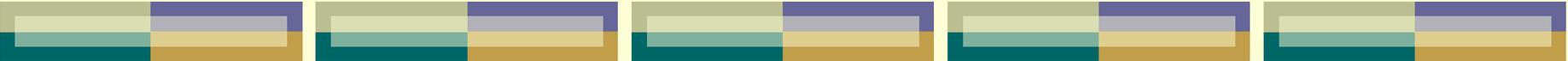
ISSN: 1949-4823

Volume 3, Issue 1

2012

SMART NANOCOMPOSITES

NOVA



Спасибо

за

ВНИМАНИЕ

