

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЧАСТЬ 2

В этой части статьи продолжается обсуждение вопросов построения струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) для контроля напряженности электрического поля. Рассматриваются возможности повышения разрешающей способности. Представлен вариант интерференционной СКОИС, использующей триангуляционные стробоскопические измерения смещений заряженных движущихся капель при помощи импульсного акустооптического интерферометра поперечных смещений лазерного луча. Обсуждаются возможности повышения соотношения заряд/масса заряженных капель, особенности применения в качестве жидкостей жидких металлов и их двух- и трехкомпонентных сплавов, использования неоднородных капель в виде полых, пустотелых микросфер, подобных мыльным пузырям и/или на основе пористого (дисперсного) материала.

Ключевые слова: капельный поток, электростатический заряд, напряженность электрического поля, стробоскоп, триангуляционные измерения, акустооптический модулятор, интерферометр перемещений.

Введение. Измерения напряженности электрического поля (НЭП) E используются во многих отраслях промышленности, в частности, ракетно-космической и атомной, в электро- и радиотехнике, приборостроении и других. Измерениям НЭП посвящено много научных публикаций [1–6], и активность таких исследований обусловлена бурным развитием микро-, оптоэлектроники и других технологий, осуществленных на стыке разных направлений технической физики.

Одно из таких направлений связано с развитием струйно-капельных технологий [7–12], а именно со струйно-капельными оптическими измерительными системами (СКОИС) [13–15]. Возможность их использования для задач контроля НЭП E впервые показана в 2021 году [15]. В основе принципа действия СКОИС НЭП лежат две идеи:

1) создание направленного потока заряженных капель, являющихся объектом, телом, траектория движения которых смещается на $\Delta l_{\text{см}}$ от воздействия НЭП E , как в кинескопе телевизора;

2) использование капель в качестве криволинейных отражателей для стробоскопического оптического измерителя этих смещений.

В [13] были представлены СКОИС НЭП с измерителем смещений капель на основе матричного регистратора и ее основные функциональные зависимости с оценкой разрешающей способности НЭП. Однако в этой работе не нашло отражение вопросы повышения разрешаю-

щей способности СКОИС для измерения НЭП. Во-первых, за счет реализации оптического измерителя на основе более точных интерференционных методов и средств измерений смещений, в частности, импульсного акустооптического (АО) интерферометра смещений лазерного луча (далее — интерференционный измеритель) [16]. Во-вторых, за счет повышения соотношения заряд/масса заряженных капель $\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}$ разными способами, например, использования в качестве жидкостей жидких металлов или их сплавов, реализацией капель неоднородными в виде пористой структуры и/или полыми, пустотелыми в виде микросферы, подобных мыльным пузырям. Эти вопросы в открытой печати ранее не рассматривались, и данная работа направлена на восполнение этого недостатка.

1. Повышение разрешающей способности за счет совершенствования оптического измерителя. Для измерения НЭП вдоль одной координаты на основе электрокапельструйного генератора и импульсного интерференционного измерителя смещений капель разработана интерференционная СКОИС, основанная на использовании интерференционного измерителя, состав, принцип действия и особенности работы которой рассмотрены далее.

1.1. Состав и принцип действия СКОИС для измерения НЭП. Разработанная СКОИС НЭП изображена на рис. 1а, на котором обозначены генератор капель 1, струя, состоящая из нерас-

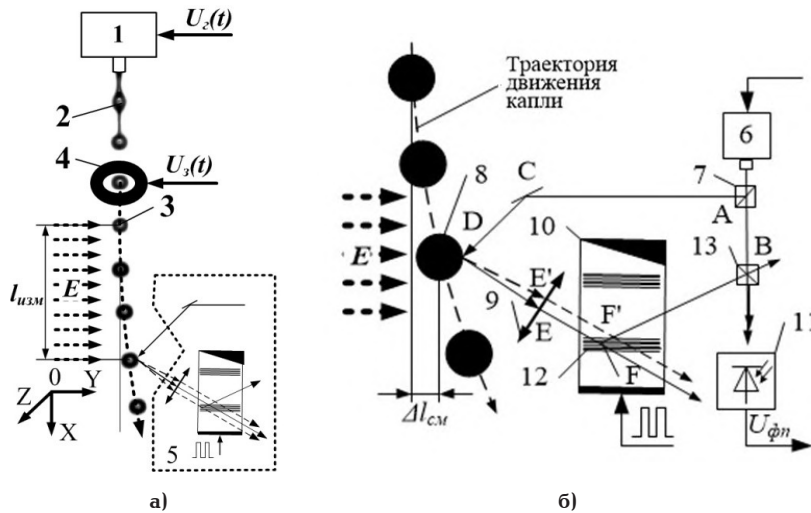


Рис. 1. Схемы интерференционных измерений НЭП: общая измерительная схема (а), схема интерференционного измерителя смещений капли (б)

павшейся части струи 2 и капельного потока 3, зарядное устройство (устройство сообщения униполярного заряда каплям) 4, импульсный интерференционный измеритель смещений капель (далее — интерференционный измеритель) 5. Конструктивно при использовании специальных жидкостей, например, расплавов химически активных или высокотемпературных металлов СКОИС НЭП может быть реализован внутри герметичного канала, в том числе оптически прозрачного и/или со специальной оснасткой. Однако для повышения наглядности это не показано на рис. 1а.

Под действием постоянного давления и дополнительного возмущения, создаваемого моногармоническим (с высокой спектральной чистотой) сигналом $U_r(t)$ из генератора капель 1 через сопло в режиме вынужденного капиллярного распада вытекает жидкая струя. Она состоит из нераспавшейся части струи 2 и потока движущихся капель 3 диаметром не более 1–1,5 мм с высокими монодисперсностью (малым разбросом размеров) и когерентностью (малым разбросом интервалов между каплями).

В процессе отделения от струи каждая капля заряжается от зарядного устройства 4 до значения $q_{\text{кап}}$. Заряженная движущаяся капля, пролетая через измерительный участок $l_{\text{изм}}$, отклоняется на значение, соответствующее действию НЭП.

В соответствии с результатами расчетов смещений движущейся капли $\Delta l_{\text{кап}}$, проведенных в [10, 11], и по аналогии с электрическим полем, созданным двумя плоскопараллельными отклоняющими пластинами длиной l_0 [10], формирующим измерительный участок $l_0 = l_{\text{изм}}$, при условии пренебрежения влиянием поля заряда этой капли имеем $E = \frac{U_0}{l_0}$ и можем записать:

$$\Delta l_{\text{см}} = \frac{l_{\text{изм}}^2}{2v_{\text{кап}}^2} \cdot \frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}} \cdot E_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{изм}}$ — длина измерительного участка, $v_{\text{кап}}$, $q_{\text{кап}}$ и $m_{\text{кап}}$ — скорость движения, заряд и масса капли.

Синхронно с полетом капли в определенные моменты времени цикла измерения капля импульсно освещается лазерным потоком, формируя соответствующий отраженный поток. При нулевой НЭП $E_{\text{изм}} = 0$ положение отраженного потока можно считать опорным, а при измерении ненулевой НЭП, когда $E_{\text{изм}} \neq 0$, он приобретает смещение угловое и линейное $\Delta l_{\text{см}}$, по результатам измерения которого можно определить смещение капли $\Delta l_{\text{кап}}$. Так реализуются стробоскопические измерения смещений отраженного потока и смещения капли интерференционным измерителем 5.

1.2. Состав и принцип действия интерференционного измерителя.

Для измерения отклонений движения капель используется высокочувствительный интерференционный измеритель 5, представляющий собой, по сути, лазерный импульсный интерферометр перемещений Маха–Цендера с двумя плечами, разработанный для высокоточных измерений поперечных смещений лазерного потока в задаче контроля отклонений от прямолинейности [16]. Его схема показана на рис. 1б, на котором обозначены импульсный лазер 6, светоделители 7 и 13, капля 8, оптическая схема 9, АО модулятор 10, фотоприемник 11, бегущий АО импульс 12.

Принцип действия основан на импульсном измерении фазового сдвига световых волн, возникающего из-за смещений центра АО взаимодействия вследствие поперечных перемещений отраженного лазерного луча $\Delta l_{\text{отр}}$ от смещений капли $\Delta l_{\text{кап}}$. В ней используется дифракция света в режиме Брэгга на коротком пути ультразвуковых волн, «окне дифракции», пробегающем через АО модулятор 10, а физические аспекты подобных режимов работы ЛИС рассмотрены в [16].

Во время действия импульса света потоки проходят следующими маршрутами:

— в опорном плече: А → В (светоделитель 13) → фотоприемник 11;

— в измерительном плече: А → С (отражатель) → D (поверхность капли) → E (оптическая схема 9) → F (АО модулятор 10) → В (светоделитель 13) → фотоприемник 11.

Пространственное совмещение опорного и измерительного потоков в светоделителе 13 во время действия импульса света приводит к их интерференции и формированию импульсного измерительного сигнала на выходе фотоприемника 11.

Смещения капли $\Delta l_{см}$ приводят к изменению угла отражения, преобразуемые оптической схемой 9 в поперечные смещения лазерного луча с прохождением оптического потока в измерительном плече по следующему маршруту: D (поверхность капли) → E' → F' → В → фотоприемник 11. Как показано в [16], фазовый сдвиг, вызванный поперечными смещениями лазерного луча, можно записать с помощью выражения:

$$\Delta\varphi(\Delta l_y) = \frac{2\pi\Delta l_y}{\lambda} \cdot \operatorname{tg}\Theta_b = k_u \frac{2\pi\Delta l_y}{\lambda}, \quad (2)$$

где $k_b = \operatorname{tg}\Theta_b$ — «угловой» коэффициент.

Тогда выражение для расчета смещения оптического потока $\Delta l_{отр}$ от измеренного фазового сдвига $\Delta\varphi$ можно записать в виде:

$$\Delta l_{отр} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi \cdot k_b} \lambda. \quad (3)$$

Достижимая в настоящее время на практике разрешающая способность (пороговое смещение) поперечных смещений может составить $\Delta l_{пор} \approx \lambda/135 \approx 0,005 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ при $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ [16].

На рис. 2 показан интерференционный сигнал импульсных фазовых измерений, формируемый фотоприемником 11 (рис. 16) интерференционного измерителя 5 при дифракции оптического потока на бегущем модулированном импульсе в АО модуляторе 10 [17].

1.3. Расчет смещения капли на основе учета линейного смещения отраженного луча. Данный подход основан на фокусировании оптического потока после оптической системы 9, фокус которого расположен на середине АО модулятора 10, совпадая с центром АО взаимодействия. Смещения капли $\Delta l_{см}$ в итоге приводят к смещениям фокуса, позволяя при определенных соотношениях оптических параметров оптической системы 9 и режима АО дифракции света связать его с пороговым смещением $\Delta l_{пор'}$, регистрируемым интерференционным измерителем 5, и использовать следующее выражение:

$$\Delta l_{см} = k_{лс} \cdot \Delta l_{пор'}, \quad (4)$$

где $k_{лс}$ — коэффициент линейного смещения.

Данный подход, связывая перемещения капли $\Delta l_{см}$, и является более простым и будет использован в дальнейшем для оценки порога чувствительности СКОИС НЭП.

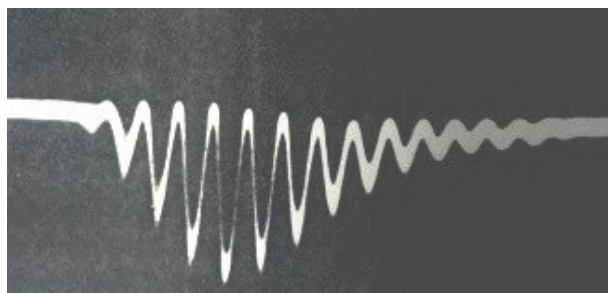


Рис. 2. Интерференционный сигнал, полученный в лазерном импульсном интерферометре перемещений во время действия импульса света при дифракции на коротком пути в АО модуляторе; взято из [17]

1.4. Разрешающая способность интерференционной СКОИС НЭП. Расчеты показывают, что для водяной капли диаметром $d_{кан} = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ с максимально возможным зарядом, исключая ее дробление, $224,5 \text{ пКл} = 224,5 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$ достигается соотношение $\frac{q_{кан}}{m_{кан}} \approx 0,43 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/кг}$.

При движении такой капли со скоростью $v_{кан} = 1 \text{ м/с}$ через измерительный участок длиной $l_{изм} = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$ при минимальном значении $\Delta l_{см} = 100 \text{ мкм}$ и использовании матричного регистратора разрешающая способность (минимально обнаруживаемый уровень) НЭП соответствует $0,014 \text{ В/м}$ [15].

Оценим значение этого параметра для интерференционного измерителя, представленного выше. Используя расчет смещения капли $\Delta l_{см}$ на основе учета линейного смещения отраженного луча, согласно формуле (4), при условии $k_{лс} = 1$ можно записать $\Delta l_{см} = \Delta l_{пор'}$. Подставляя это в преобразованное выражение (1), получим искомое уравнение для расчета порога чувствительности СКОИС НЭП:

$$E_{изм} = \frac{2v_{кан}^2}{l^2} \cdot \frac{m_{кан}}{q_{кан}} \cdot \Delta l_{см} = \frac{2v_{кан}^2}{l^2} \cdot \frac{m_{кан}}{q_{кан}} \cdot \Delta l_{пор'}. \quad (5)$$

Как и в работе [15], для дальнейших расчетов применяются следующие исходные данные: $v_{кан} = 1 \text{ м/с}$, $l_{изм} = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$, $\Delta l_{см} = \Delta l_{пор'} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Значение отношения $\frac{q_{кан}}{m_{кан}}$ получено на основе формулы Рэлея [8, 10, 11] для капли воды (плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) диаметром $d_{кан} = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ с максимально возможным зарядом, исключая ее дробление с учетом того, что $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$ электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума), а σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости (для воды $\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$):

$$q_{кан} \leq q_{гроб} = \sqrt{8\pi^2 \epsilon_0 \sigma d_k^3}. \quad (6)$$

Согласно этой формуле, получаем значение максимального заряда $q_{кан}$ капли воды $\phi 1 \text{ мм}$: $q_{кан} = 224,5 \text{ пКл} = 224,5 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$. С учетом того, что массу капли можно выразить через ее плотность ρ и объем шара $V_{кан}$: $m_{кан} = \rho V_{кан} = \rho \pi d_{кан}^3 / 6$, за-

пишем формулу для соотношения заряд/масса

$$\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}};$$

$$\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}} = \frac{6\sqrt{8\pi^2\varepsilon_0\sigma}d_{\text{кап}}^3}{\rho\pi d_{\text{кап}}^3} = 6\sqrt{8\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{d_{\text{кап}}^3} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho^2}} \approx 50,5 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{\text{кап}}^3}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho^2}}. \quad (7)$$

Тогда в соответствии с уравнением (7) можно определить соотношение заряд/масса капли воды $\phi 1$ мм:

$$\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}} = \frac{6q_{\text{кап}}}{\pi \cdot \rho \cdot d_{\text{кап}}^3} = \frac{6 \cdot 224,5 \cdot 10^{-12}}{3,14 \cdot 1000 \cdot (10^{-3})^3} \approx 428,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

И, согласно формуле (5), в итоге получаем искомое значение разрешающей способности СКОИС НЭП на основе интерференционного измерителя:

$$E_{\text{изм}} = \frac{2 \cdot 1^2}{0,05^2 \cdot 428,8 \cdot 10^{-6}} \cdot 5 \cdot 10^{-9} \approx 9,3 \frac{\text{мВ}}{\text{м}}. \quad (8)$$

Полученное значение в дальнейшем может быть уточнено для всех параметров интерференционного измерителя 5, но уже сейчас позволяет оценить уровень данной СКОИС НЭП и использоваться в качестве т.н. опорного значения для сравнения с аналогичными параметрами других измерительных систем.

2. Повышение разрешающей способности при изменении параметров капель капельного потока. В соответствии с уравнениями (1) и (7) повышение разрешающей способности возможно также и за счет следующих мер:

1) изменением параметров СКОИС, а именно увеличением $q_{\text{кап}}$, уменьшением $v_{\text{кап}}$ размера (радиус $r_{\text{кап}}$, диаметр $d_{\text{кап}}$) и массы капель $m_{\text{кап}}$;

2) выбором материала с максимальным соотношением заряд-масса $\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}$;

3) изменением структуры капли и перехода от использования цельной однородной капли к неоднородной, а именно полой, пустотелой капли в виде микросферы, подобной мыльному пузырю (рис. 3а);

4) реализацией пористой, дисперсной, пенной структурой материала (рис. 3б). Подробнее особенности использования пеноматериалов будут рассмотрены в следующих авторских публикациях.

С учетом этого выражение (1) можно записать в виде

$$E = \frac{1}{k_{\text{изм}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{пол}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{пор}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{мат}}} \cdot \frac{m_{\text{кап}}}{q_{\text{кап}}} \cdot \Delta_{\text{см}}, \quad (9)$$

где $k_{\text{пол}}$, $k_{\text{пор}}$, $k_{\text{мат}}$ — коэффициенты полости микросферы, пористости и материала, используемые для СКОИС НЭП с повышением разрешающей способности. Рассмотрим возможности повышения разрешающей способности СКОИС НЭП более подробно.

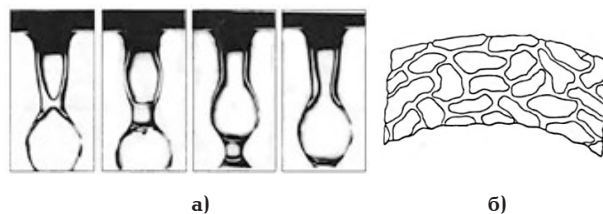


Рис. 3. Особенности капель: полые капли, их зарождение и развитие (а), структура пористой капли (б)

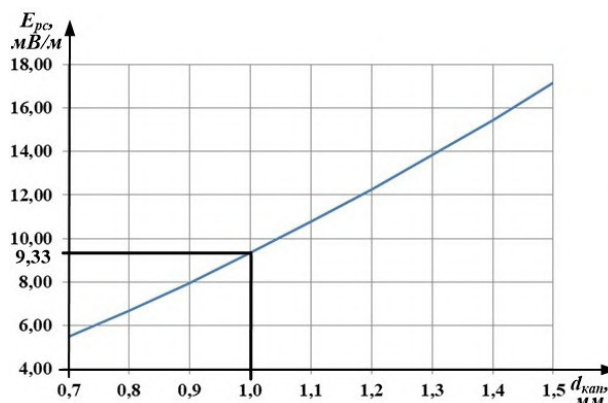


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности E_{pc} от изменения диаметра капли в диапазоне от 0,7 до 1,5 мм

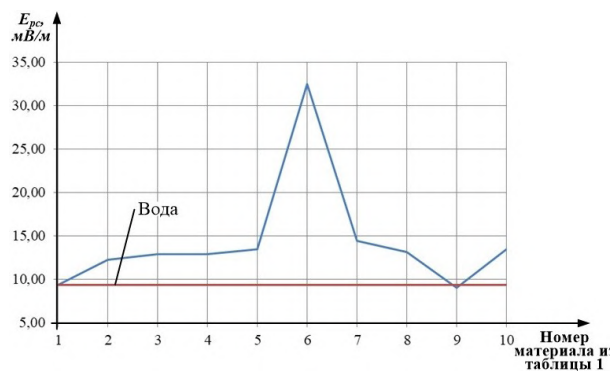
2.1 Изменение параметров СКОИС. Увеличение соотношения заряд-масса $\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}$ и, соответственно, повышение разрешающей способности E_{pc} ограничено максимальным зарядом капли, определяемым возможностью ее дробления согласно уравнению (6) или эффективно зарядного устройства. В связи с этим необходимо рассмотреть возможности изменений разрешающей способности E_{pc} от изменения диаметра капли. Это сделано на примере использования воды. На рис. 4 показана зависимость разрешающей способности E_{pc} от изменения диаметра капли воды ($q_{\text{макс}} = 224,5 \cdot 10^{-12}$ Кл, $\sigma = 0,072$ Н/м, $\rho = 1000$ кг/м³) в диапазоне от 0,7 до 1,5 мм. Эта зависимость носит почти линейный характер со значением 9,33 мВ/м для капли $\phi 1$ мм.

2.2. Выбор материала с возможностью максимального соотношения заряд-масса. Как следует из уравнений (5) и (7) для фиксированного диаметра капли, когда $d_{\text{кап}} = \text{const}$, значения $E_{\text{пор}}$ и соотношения $\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}$ зависят от соотношения $\frac{\sigma}{\rho^2}$. Поэтому с целью поиска минимума $E_{\text{пор}}$ нужно рассчитать и сравнить значения соотношения $\frac{\sigma}{\rho^2}$ и $\frac{q_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}}}$ для разных материалов, веществ и сплавов. Далее проанализировано использование в качестве материала капель разных веществ: жидкостей, стекла, пластмасс, металлов, их двух- и трехкомпонентных сплавов и рассчитаны значения порога чувствительности $E_{\text{пор}}$.

Таблица 1

Физические характеристики жидкостей, стекол и пластмасс и определение отношения заряд/масса $q_{\text{капл}}/m_{\text{капл}}$ для капли $\phi 1$ мм

№	Вещество/материал	Поверхностное натяжение (в жидком состоянии) σ , Н/м	Плотность ρ , кг/м ³	Масса капли $\phi 1$ мм, 10^{-9} кг	Максимальный расчетный заряд q (для капли $\phi 1$ мм), 10^{-12} Кл	Максимальный возможный заряд q (для капли $\phi 1$ мм), 10^{-12} Кл	Отношение максимально возможного заряда к массе (для капли $\phi 1$ мм), q/m , 10^{-3} Кл/кг	Порог чувствительности $E_{\text{пор}}$, мВ/м
1	Вода	0,072	1000	523,00	224,3	224,3	0,429	9,33
2	Глицерин	0,066	1260	638,98	214,72	214,72	0,326	12,28
3	Оливковое масло	0,032	920	481,16	149,51	149,51	0,311	12,87
4	Керосин	0,024	800	418,40	129,48	129,48	0,309	12,93
5	Спирт	0,022	800	418,40	123,97	123,97	0,296	13,50
6	Стекло	0,037	2500	1307,50	160,77	160,77	0,123	32,53
7	Оргстекло	0,04	1150	601,45	167,16	167,16	0,278	14,39
8	Полистирол	0,04	1050	549,15	167,16	167,16	0,304	13,14
9	Полиэтилен	0,038	700	366,10	162,93	162,93	0,445	8,99
10	Полипропилен	0,028	900	470,70	139,85	139,85	0,297	13,46

Рис. 5. Зависимость разрешающей способности E_{pc} для разным материалов (номера материалов соответствуют строкам табл. 1)Рис. 6. Зависимость разрешающей способности E_{pc} для разных веществ (металлов и полупроводников) с плотностью до 10000 кг/м^3 и температурой плавления до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2.1. Анализ соотношений заряд/масса капли для капли жидкостей, стекол и пластмасс. В табл. 1 приведены физические характеристики и расчетные значения соотношения заряд/масса $\frac{q_{\text{капл}}}{m_{\text{капл}}}$ и порога чувствительности $E_{\text{пор}}$ для капли $\phi 1$ мм из следующих сред: вода, глицерин, оливковое масло, керосин, спирт, стекло, оргстекло, полистирол, полиэтилен, полипропилен. На рис. 5 изображена зависимость разрешающей способности E_{pc} , нумерация материалов по оси абсцисс соответствует нумерации строк в табл. 1. Как видно на рис. 5, при использовании полиэтилена (номер 9) имеется возможность достичь разрешающей способности меньше, чем у воды, не превышая обоими значения 10 мВ/м. Таким образом, использование полиэтилена и воды наиболее перспективно для использования в СКОИС НЭП.

2.2.2. Анализ соотношений заряд/масса для капли жидких металлов и полупроводников. В табл. 2 приведены физические характеристики и расчетные значения соотношения заряд/масса $\frac{q_{\text{капл}}}{m_{\text{капл}}}$ и разрешающей способности E_{pc} для капли $\phi 1$ мм из металлов и полупроводников с плотностью до 10000 кг/м^3 и температурой плавления до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$: литий (Li), натрий (Na), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), цезий

Таблица 2

Физические характеристики металлов с плотностью до 10000 кг/м³ и температурой плавления до 1600 °С, отношение заряда/масса $q_{\text{заряд}}/m_{\text{заряд}}$ для капли $\phi 1$ мм

№	Металл	Температура плавления $T_{\text{плав}}$, °С	Поверхностное натяжение (в жидком состоянии) σ , Н/м	Плотность ρ , кг/м ³	Масса капли $\phi 1$ мм, 10^{-9} кг	Максимальный расчетный заряд q , 10^{-12} Кл	Максимально возможный заряд q (для капли $\phi 1$ мм), 10^{-12} Кл	Отношение максимально возможного заряда к массе (для капли $\phi 1$ мм), q/m , 10^{-3} Кл/кг	Порог чувствительности $E_{\text{пор}}$, мВ/м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Литий (Li)	179	0,400	539	281,90	528,6	400*	1,419	2,82
2	Натрий (Na)	97,8	0,205	986	515,68	378,4	378,42	0,734	5,45
3	Калий (K)	63,6	0,110	862	450,83	277,2	277,2	0,615	6,51
4	Кальций (Ca)	842	0,340	1550	810,65	487,3	400*	0,493	8,11
5	Магний (Mg)	650	0,550	1740	910,02	619,8	400*	0,440	9,10
6	Цезий (Cs)	28,4	0,070	1900	993,70	221,1	221,13	0,223	17,98
7	Кремний (Si)	1414	0,730	2328	1217,54	714,1	400*	0,329	12,18
8	Алюминий (Al)	660	0,875	2700	1412,10	781,8	400*	0,283	14,12
9	Барий (Ba)	727	0,220	3500	1830,50	392,0	392,02	0,214	18,68
10	Германий (Ge)	937	0,600	5350	2798,05	647,4	400*	0,143	27,98
11	Галлий (Ga)	30	0,720	5910	3090,93	709,2	400*	0,129	30,91
12	Цинк (Zn)	906	0,820	7133	3730,56	756,8	400*	0,107	37,31
13	Олово (Sn)	232	0,550	7290	3812,67	619,8	400*	0,105	38,13
14	Марганец (Mn)	1244	1,100	7440	3891,12	876,6	400*	0,103	38,91
15	Железо (Fe)	1539	1,800	7870	4116,01	1121,3	400*	0,097	41,16
16	Кадмий (Cd)	320	0,630	8640	4518,72	663,4	400*	0,089	45,19
17	Кобальт (Co)	1494	1,840	8700	4550,10	1133,7	400*	0,088	45,50
18	Медь (Cu)	1084	1,100	8940	4675,62	876,6	400*	0,086	46,76
19	Никель (Ni)	1455	1,750	9900	5177,70	1105,6	400*	0,077	51,78

Примечание: * — взято значение максимально возможного реализуемого заряда, равного 400 пКл [8]

Таблица 3

Физические характеристики сплавов металлов с плотностью до 10000 кг/м³ и температурой плавления до 1600 °С, отношение заряда/масса $q_{\text{нор}}/m_{\text{нор}}$ для капли $\phi 1$ мм

№	Химическая формула сплава	Температура измерения $T_{\text{изм}}$, °С	Поверхностное натяжение (в жидком состоянии) σ , Н/м	Плот-ть ρ , кг/м ³	Масса капли $\phi 1$ мм, мкг	Максимальный расчетный заряд q , пКл	Максимальный возможный заряд q , пКл	Отношение возможн. макс. заряда к массе (с1 кап = 1,0 мм) надо разделить на 1000, q/m	$E_{\text{нор}}$ мВ/м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Двухкомпонентные (бинарные) сплавы									
1	Li-Na	223	0,260	762,5	398,79	426,2	400*	1,003	3,99
2	Li-Sn	350	0,430	3915,0	2047,55	548,1	400*	0,195	20,48
3	Na-K	100	0,120	924	483,25	289,5	289,5	0,599	6,68
4	Na-Rb	100	0,100	1259	658,46	264,3	264,3	0,401	9,97
5	Na-Cs	100	0,080	1443	754,69	236,4	236,4	0,313	12,77
6	K-Rb	100	0,105	1200	627,60	270,8	270,8	0,432	9,27
7	K-Cs	100	0,075	1381	722,26	228,9	228,9	0,317	12,62
8	Al-In	700	0,500	5005	2617,62	591,0	400*	0,153	26,18
9	Al-Zn	700	0,740	4920	2573,16	719,0	400*	0,155	25,73
10	Al-Sn	700	0,525	4995	2612,39	605,6	400*	0,153	26,12
11	Sn-Si	1500	0,250	4810	2515,63	417,9	400*	0,159	25,16
12	In-Pb	300	0,525	9330	4879,59	605,6	400*	0,082	48,80
13	In-Sb	650	0,445	7000	3661,00	557,5	400*	0,109	36,61
14	Sn-Pb	347	0,545	9320	4874,36	617,0	400*	0,082	48,74
15	Cu-Ce	650	0,630	7850	4105,55	663,4	400*	0,097	41,06
Трехкомпонентные сплавы									
16	Na-Cs-K	100	0,090	1250	653,75	250,7	250,7	0,384	10,43
17	Na-K-Rb	50	0,085	1130	590,99	243,7	243,7	0,412	9,70
18	Na-Cs-Rb	50	0,077	1475	771,43	231,9	231,9	0,301	13,30
19	Al-In-Sn	700	0,575	5770	3017,71	633,8	400*	0,133	30,18

Примечание: * — взято значение максимально возможного реализуемого заряда, равного 400 пКл [8]

(Cs), кремний (Si), алюминий (Al), барий (Ba), германий (Ge), галлий (Ga), цинк (Zn), олово (Sn), марганец (Mn), железо (Fe), кадмий (Cd), кобальт (Co), медь (Cu), никель (Ni). Зависимость разрешающей способности E_{pc} для этих химических веществ приведена на рис. 6.

Особенность расчетов для вышеупомянутых металлов и полупроводников заключается в том, что на данном уровне технологий максимальный возможный заряд капли не превышает 400 пКл [8]. Поэтому при превышении расчетного значения заряда капли $q_{кап}$, обусловленным ее дроблением (колонка 7), тем не менее за основу для дальнейших расчетов $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$ и разрешающей способности E_{pc} берется заряд 400 пКл (колонка 8). Такой прием актуален при использовании лития, кальция, магния, кремния, алюминия, германия, галлия, цинка, олова, марганца, железа, кадмия, кобальта, меди и никеля. Также принято допущение, что плотность твердого состояния металла примерно равна его жидкому состоянию: $\rho_{тв} \approx \rho_{ж}$.

Таким образом, как следует из расчетных данных, приведенных в табл. 2, при использовании в СКОИС НЭП капли $\phi 1$ мм из лития, натрия, калия, кальция и магния значения разрешающей способности E_{pc} составляют 2,82, 5,45, 6,51, 8,11, 9,10 мВ/м, т.е. меньше, чем у воды, не превышая значения 10 мВ/м. Как видно, применение лития позволяет достичь рекордной разрешающей способности E_{pc} .

2.2.3. Анализ соотношений заряд/масса для капли жидких сплавов металлов. Одной из целей сбора и анализа данных для сплавов является поиск нелинейных зависимостей коэффициентов поверхностного натяжения $\sigma_{сгл}$ от соотношений концентрации сплавов, использование которых позволило найти наибольшее значение соотношения заряд-масса $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$ и разрешающей способности E_{pc} в соответствии с выражением (7). Особый научный интерес представляют сплавы из металлов щелочной группы с плотностью меньше воды, т.е. литий, натрий, калий.

2.2.3.1. Анализ соотношений заряд/масса для капли из двухкомпонентных (бинарных) сплавов металлов. В табл. 3 (строки 2–15) приведены физические характеристики и расчетные значения соотношения заряд/масса $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$ и разреша-

ющей способности E_{pc} для капли $\phi 1$ мм из жидких двухкомпонентных сплавов: лития-натрия (Li-Na), лития-олова (Li-Sn), натрия-калия (Na-K), натрия-рубидия (Na-Rb), натрия-цезия (Na-Cs), калия-рубидия (K-Rb), калия-цезия (K-Cs), алюминия-индия (Al-In), алюминия-цинка (Al-Zn), алюминия-олова (Al-Sn), олова-кремния (Sn-Si), индия-свинца (In-Pb), индия-ниобия (In-Sb), олова-свинца (Sn-Pb), меди-церия (Cu-Ce) [18–22]. Зависимость разрешающей способности E_{pc} для этих сплавов приведена на рис. 7.

Интересной особенностью обладает оловянно-свинцовый сплав с нелинейной, близкой к колебательной затухающей зависимостью поверхностного натяжения σ от концентрации олова и свинца (рис. 8) [19]. Графики построены на основе результатов исследований двух разных коллективов. Данные для графиков 1, 2 получены первым коллективом при температуре 520 К и 620 К соответственно, а данные для графика 3 — вторым коллективом при 520 К [19]. Тем не менее такой нелинейный характер не позволяет достичь высокой разрешающей способности E_{pc} .

Таким образом, как следует из расчетных данных, приведенных в табл. 3 (строки 2–15), при использовании в СКОИС НЭП капли $\phi 1$ мм из жидких сплавов лития-натрия, натрия-калия, натрия-рубидия достигается максимальная разрешающая способность E_{pc} , составляя 3,99; 6,68; 9,97; 9,27 мВ/м соответственно.

2.2.3.2. Анализ соотношений заряд/масса для капли жидких трехкомпонентных сплавов металлов. В табл. 3 (строки 16–19) приведены физические характеристики и расчетные значения соотношения заряд/масса $\frac{q_{кап}}{m_{кап}}$ и порога чувствительности $E_{пор}$ для капли $\phi 1$ мм из жидких трехкомпонентных сплавов: натрий-цезий-калий (Na-Cs-K), натрий-калий-рубидий (Na-K-Rb), натрий-цезий-рубидий (Na-Cs-Rb), алюминий-индий-олово (Al-In-Sn) [23]. Зависимость разрешающей способности E_{pc} для этих сплавов приведена на рис. 9. Как следует из полученных данных, максимальные значения разрешающей способности E_{pc} составляют 9,7 и 10,43 мВ/м для сплавов натрий-калий-рубидий и натрий-цезий-калий соответственно. Эти значения приближаются к таковой для воды — 9,33 мВ/м, показывая их высокую перспективность.

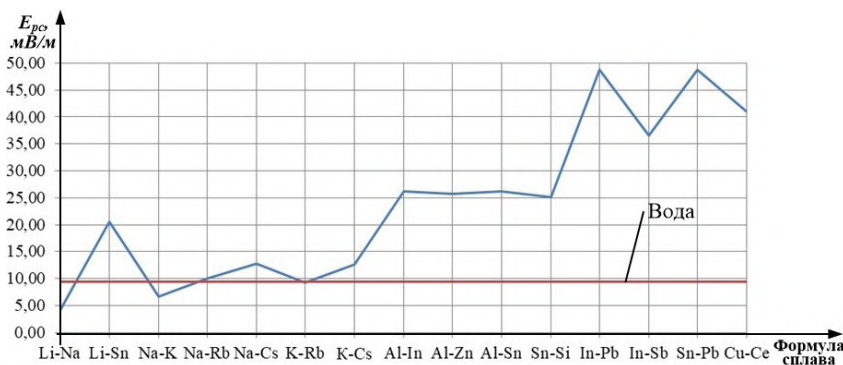


Рис. 7. Зависимость разрешающей способности E_{pc} от составов двухкомпонентных (бинарных) сплавов

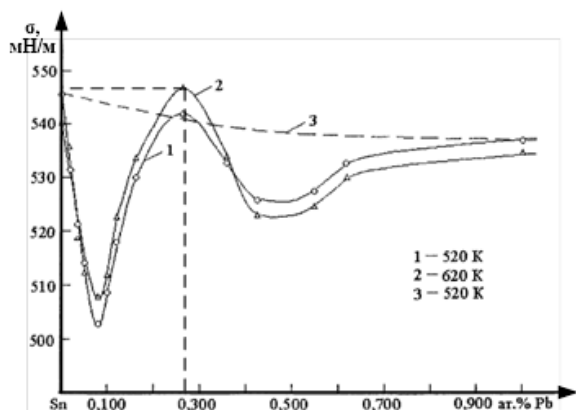


Рис. 8. Зависимости поверхностного натяжения оловянно-свинцового (Sn-Pb) сплава от концентрации свинца (Pb) [19]

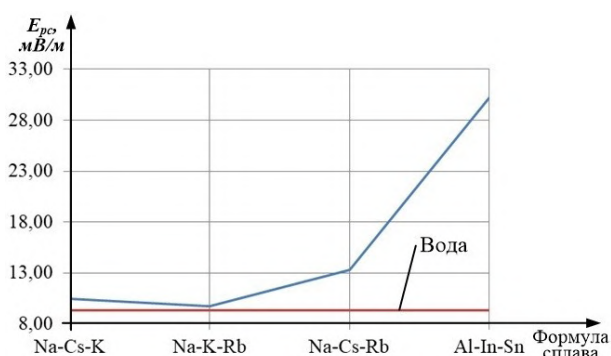


Рис. 9. Зависимость разрешающей способности E_{pc} от составов трехкомпонентных сплавов: натрий-цезий-калий (Na-Cs-K), натрий-калий-рубидий (Na-K-Rb), натрий-цезий-рубидий (Na-Cs-Rb), алюминий-индий-олово (Al-In-Sn)

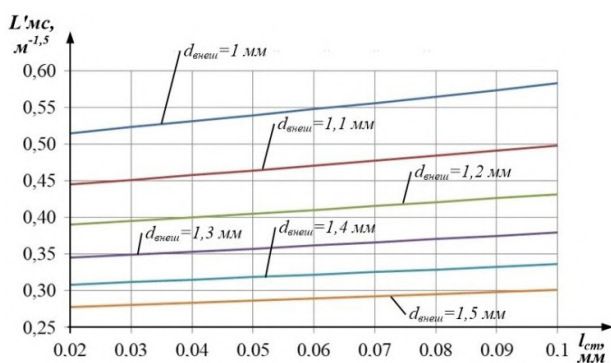


Рис. 10. Зависимости размерного параметра микросферы (полый капля) L'_{vc} от толщины стенки l_{cm}

2.3. Изменение структуры капли за счет перехода от цельной однородной капли к неоднородной. Расчет эффективности повышения разрешающей способности E_{pc} СКОИС НЭП при переходе от цельной однородной капли к неоднородной проведем следующим образом.

Поверхностное натяжение, согласно современному подходу в физике, является частью внутренней энергии.

Поэтому можно предположить, что максимальное значение заряда микросферы будет определяться максимальным зарядом внешней сферы, ограниченным поверхностным натяжением исходной капли, без учета заряда внутренней сферы, связанного поверхностным натяжением «внутренней» отсутствующей капли:

$$q_{mc} = q_{внеш} - q_{внутр} = \sqrt{8\pi^2 \epsilon \epsilon_0 \sigma d_{внеш}^3} - \sqrt{8\pi^2 \epsilon \epsilon_0 \sigma d_{внутр}^3} = \sqrt{8\pi^2 \epsilon \epsilon_0 \sigma} (\sqrt{d_{внеш}^3} - \sqrt{d_{внутр}^3}), \quad (10)$$

где $d_{внеш}$ и $d_{внутр}$ — внешний и внутренний диаметр капли.

Массу полых каплей («мыльных пузырей», микросфер, пустотелого шара) можно определить аналогично:

$$m_{mc} = m_{кап2} - m_{кап1} = \rho \cdot V_{кап2} - \rho \cdot V_{кап1} = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{внеш}}{2}\right)^3 - \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{внутр}}{2}\right)^3 = \frac{\pi \cdot \rho}{6} (d_{внеш}^3 - d_{внутр}^3). \quad (11)$$

С учетом этого отношение заряда к массе $\frac{q_{vc}}{m_{vc}}$ для микросферы можно записать в виде выражения

$$\frac{q_{vc}}{m_{vc}} = \frac{\sqrt{8\pi^2 \epsilon \epsilon_0 \sigma} (\sqrt{d_{внеш}^3} - \sqrt{d_{внутр}^3})}{\frac{\pi \cdot \rho}{6} (d_{внеш}^3 - d_{внутр}^3)} \approx \frac{17\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \sigma}}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{d_{внеш}^3} - \sqrt{d_{внутр}^3}}{d_{внеш}^3 - d_{внутр}^3} = \frac{17\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \sigma}}{\rho} \cdot L'_{vc}, \quad (12)$$

где L'_{vc} можно принять как размерный параметр микросферы, $m^{-3/2}$, записывая

$$L'_{vc} = \frac{\sqrt{d_{внеш}^3} - \sqrt{d_{внутр}^3}}{d_{внеш}^3 - d_{внутр}^3}. \quad (13)$$

На рис. 10 изображены графики зависимостей размерного параметра микросферы L'_{vc} от толщины стенки l_{cm} (для значений от 0,02 до 0,1 мм с шагом 0,1 мм), равной разнице внешнего (для значений от 1 до 1,5 мм с шагом 0,1 мм) и внутреннего диаметров:

$$l_{cm} = d_{внеш} - d_{внутр}. \quad (14)$$

Как видно, рассчитанные значения размерного параметра микросферы L'_{vc} имеют небольшую линейную зависимость от l_{cm} .

Заключение.

1. Реализация СКОИС НЭП на основе интерференционного измерителя при использовании движущихся со скоростью 1 м/с заряженных до максимального значения капель воды $\phi 1$ мм позволяет достичь порога чувствительности на уровне $\approx 9,3$ мВ/м.

2. При использовании в СКОИС НЭП таких материалов, как вода, глицерин, оливковое масло, керосин, спирт, стекло, оргстекло, полистирол, полиэтилен, полипропилен самыми перспективными являются полиэтилен и вода, обеспечивая достижение порога чувствительности $E_{пор}$ менее 10 мВ/м.

3. При использовании в СКОИС НЭП жидких лития, натрия, калия, кальция и магния значения разрешающей способности E_{pc} составляют 2,82; 5,45; 6,51; 8,11; 9,10 мВ/м, т.е. меньше, чем у воды, не превышая значения 10 мВ/м. Как видно, применение лития позволяет достичь рекордной разрешающей способности E_{pc} .

4. При использовании в СКОИС НЭП в качестве жидкостей двухкомпонентных сплавов: лития-натрия (Li-Na), лития-олова (Li-Sn), натрия-калия (Na-K), натрия-рубидия (Na-Rb), натрия-цезия (Na-Cs), калия-рубидия (K-Rb), калия-цезия (K-Cs), алюминия-индия (Al-In), алюминия-цинка (Al-Zn), алюминия-олова (Al-Sn), олова-кремния (Sn-Si), индия-свинца (In-Pb), индия-ниобия (In-Sb), олова-свинца (Sn-Pb), меди-церия (Cu-Ce) капли $\phi 1$ мм лучшими являются сплавы лития-натрия, натрия-калия и натрия-рубидия. Максимальная разрешающая способность E_{pc} для них достигает значений 3,99; 6,68; 9,97; 9,27 мВ/м соответственно. Эти значения лучше разрешающей способности при использовании в СКОИС НЭП воды — 9,33 мВ/м.

5. При использовании в качестве жидкостей в СКОИС НЭП жидких расплавов трехкомпонентных сплавов: натрий-цезий-калий (Na-Cs-K), натрий-калий-рубидий Na-K-Rb, натрий-цезий-рубидий Na-Cs-Rb, алюминий-индий-олово Al-In-Sn максимальная разрешающая способность E_{pc} составляет 9,7 и 10,42 мВ/м для первого и второго сплавов соответственно, почти приближаясь к таковой для воды — 9,33 мВ/м.

6. Как показывают представленные выше результаты исследований, СКОИС обладают существенным достоинством, демонстрируя высокую разрешающую способность измерений НЭП E , особенно, при использовании расплавов щелочных металлов: лития, натрия, калия, кальция и магния.

Библиографический список

1. Глуховец Е. Г., Бирюков С. В. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регионал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2020. С. 47–50.

2. Пат. 2734578 Российская Федерация, МП К G01R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля повышенной точности / Бирюков С. В., Глуховец Е. Г. № 2020118102; заявл. 02.06.20; опубл. 20.10.20. Бюл. № 29.

3. Пат. 2539130 Российская Федерация, МПК G01R 31/00, G01R 29/12. Волоконно-оптическое устройство

для измерения напряженности электрического поля / Мешковский И. К., Стригалев В. Е., Аксарин С. М. № 2013136095, заявл. 31.07.13; опубл. 10.01.15. Бюл. № 1.

4. Long Z., Li W. Implementation method of impulse electric field measurement system based on Wlan. AU patent; published June 10th, 2021.

5. Долматов Т. В., Букин В. В., Сахаров К. Ю., Сухов А. В., Гарнов С. В., Терехин В. А. Сверхширокополосный электрооптический преобразователь напряженности импульсного электрического поля // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 42–45.

6. Коломогорова С. С. Развитие теории и практики изотропных измерений электростатического поля на основе динамических преобразователей: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2012. 168 с.

7. Виноходов А. Ю., Кошелев К. Н., Кривцун В. М. [и др.]. Формирование мелкодисперсной жидкометаллической мишени под действием лазерных импульсов фемто- и пикосекундной длительности для лазерного плазменного источника в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 1. С. 23–28.

8. Нагорный В. С., Колодяжный Д. Ю. Электрокапельструйные форсуночные модули авиационных двигателей: моногр. Санкт-Петербург: Политех-пресс, 2020. 791 с.

9. Ankudinov V. B., Marukhin Y. A., Ogorodnikov V. P., Ryzhkov V. A. Technology for production of monodisperse spherical granules // Metallurgist. 2019. Vol. 63, № 5-6. С. 651–657. DOI: 10.1007/s11015-019-00871-2.

10. Левченко Ю. А. Управляемый метод электрокапельструйного нанесения технологических жидкостей на химические нити: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 194 с.

11. Безруков В. И. Научно-технические основы и аппаратное обеспечение автоматизированной электрокапельструйной маркировки изделий: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2003. 563 с.

12. Пщелко Н. С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2011. 372 с.

13. Леун Е. В. Вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем: принцип и режимы работы, возможности и основные характеристики // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 189–195. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-189-195.

14. Леун Е. В., Чередов А. И., Сергеев Д. В., Сысоев В. К. К вопросам построения струйно-капельных оптических измерительных систем: контроль электризации металлизированных полимерных пленок при автоматизированной лазерной перфорации // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 86–93. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-86-93.

15. Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 1 // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-83-90.

16. Леун Е. В. Совершенствование методов и средств контроля отклонений от прямолинейности на основе акустооптических гетеродинных лазерных измерительных систем // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 71–77. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-71-77.

17. Румянцев А. А. Акустооптические датчики волнового фронта световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 1994. 168 с.

18. Валеева Э. Э. Поверхностное натяжение и тепловое излучение металлических расплавов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2007. 161 с.

19. Чочаева А. М. Поверхностное натяжение сплавов металлических систем с участием свинца, лития и алюминия: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2003. 177 с.

20. Понежев М. Х. Поверхностные свойства некоторых жидкометаллических систем на основе меди, алюминия: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 1998. 115 с.

21. Куршев О. И. Плотность, поверхностное натяжение и работа выхода электрона легкоплавких металлов и сплавов: дис. ... канд. физ.-мат. наук, Нальчик, 2005. 164 с.

22. Афаунова Л. Х. Теплофизические и поверхностные свойства лития и сплавов литий-натрий, натрий-калий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. 2013. 156 с.

23. Мальсургенова Ф. М. Плотность, поверхностное натяжение и адсорбция компонентов сплавов тройной системы натрий-калий-цезий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2013. 150 с.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 2 // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 78–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-78-88.

Статья поступила в редакцию 20.01.2022 г.

© Е. В. Леун