

УДК 621.318.51

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В.А. Дятлов, А.И. Роголев

За последние годы в пленочной электронике появилось новое направление — электромеханические пленочные элементы (пленочные реле [1 — 25], пленочные резонаторы [26 — 28], пленочные (мембранные) модуляторы света [29, 30]). Разработка этих элементов вызвана тем, что ряд задач интегральной электроники невозможно решить на основе лишь свойств твердого тела. Использование электростатического взаимодействия в электромеханических пленочных элементах позволяет обеспечить их высокую энергетическую экономичность, соизмеримую или превосходящую экономичность криотронов и структур на МОП-транзисторах [5, 25].

Рассмотрим подробнее эти элементы:

1) Пленочные реле имеют малые габариты (длина мембраны около 2 мм); могут быть выполнены в виде матриц на одной подложке, в том числе совместно с полупроводниковыми элементами; обеспечивают значительно большие изменения сопротивления, чем полупроводниковые реле (больше 10^9); позволяют осуществить гальваническую развязку входных и выходных цепей. Пленочные реле по своим параметрам и габаритам принципиально совместимы с современными интегральными схемами и могут их дополнить в качестве коммутаторов. В пленочных реле возможно использование изоляторов толщины на порядок больше, чем,

например, в МОП-транзисторах, что принципиально позволяет повысить надежность пленочных реле в качестве коммутаторов при постоянно включенном напряжении питания.

2) Пленочные резонаторы обладают меньшими габаритами (длина мембран меньше 1 мм) по сравнению, например, с кварцевыми резонаторами и могут быть выполнены в виде интегральной схемы, где на одной подложке можно расположить достаточно большое число отдельных резонаторов с различными собственными частотами. Ценным качеством пленочных резонаторов является возможность перестройки их собственных частот с помощью электрического управления.

3) Пленочные модуляторы света имеют весьма малые размеры ($\approx 50 \times 10$ мкм); обладают высокими скоростями переключения ($500 + 50$ нсек); модуляторы выполняются в виде интегральной двумерной матрицы (больше 10^6 ячеек на квадратный дюйм). Эти качества пленочных модуляторов света позволяют решить проблему ввода данных в оптические вычислительные машины, которая не находит удовлетворительного решения при использовании фотоэлементов прозрачных поляризационно-оптических материалов и т.д.

Итак, электромеханические элементы обладают рядом таких особенностей, которые не только обеспечивают их конкурентоспособность с другими элементами в некоторых частных областях электроники, но и позволяют надеяться на дальнейшее их совершенствование и развитие. С другой стороны, выявились и существенные недостатки этих элементов, препятствующие их внедрению. От того, насколько устранены эти недостатки, зависит будущее некоторых применений пленочных электромеханических элементов. Поэтому целью настоящей работы состоит в том, чтобы выделить и проанализировать как положительные, так и отрицательные свойства таких элементов и наметить пути устранения их недостатков. Разумеется, всестороннее освещение этих вопросов требует еще большой исследовательской работы.

1. Конструкции электромеханических пленочных элементов

В качестве примера рассмотрим две конструкции пленочных

электростатических реле (ПЭР) с изолированными контактами (рис. 1, а, б), описанные в [2,3,23]. Здесь 1 — закрепленная на концах,

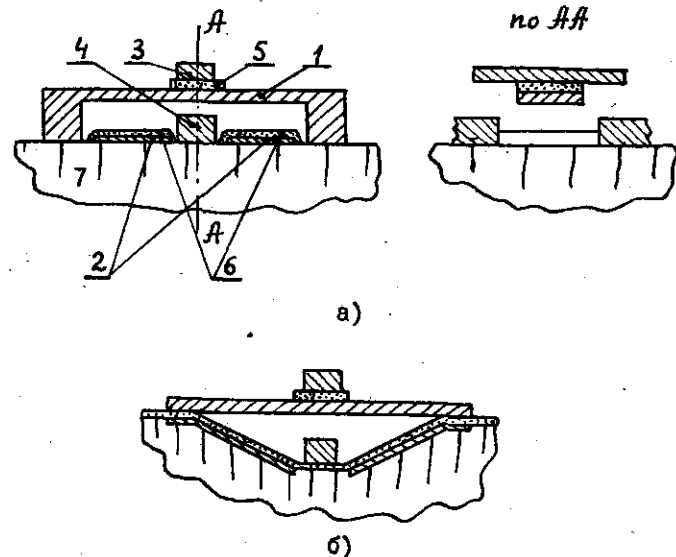


Рис. 1.

натянутая пленочная мембрана; 2 — неподвижный электрод; 3 — контактная перекладина; 4 — неподвижный контакт; 5, 6 — изоляционные пленки; 7 — подложка. Конструкция рис. 1, б отличается от конструкции рис. 1, а только формой зазора. Основываясь на электростатическом притяжении заряженных пластин 1 и 2, принцип действия этих реле, не отличается от принципа действия обычных электростатических реле. Но в конструкциях пленочных реле возможно создание зазоров намного меньших, чем в конструкциях обычных реле (порядка единиц микрона вместо сотен микрона), что позволяет уже при малых напряжениях развить значительные механические силы прижатия контактов. В то же время необходимость сохранения достаточно больших сил разрыва контактов реле требует делать более жесткой подвижную часть пленочного реле путем двустороннего закрепления мембраны и дополнительного ее натяжения [17,19,20]. Ужесточение подвижной части пленочного

реле, в свою очередь, приводит даже к некоторому дефициту указанных сил при заданном напряжении управления, и для его устранения требуется либо тщательное соблюдение заданных размеров реле и конструкции реле рис. 1, а, либо применение конструкции реле рис. 2, б. При равных условиях за счет углового профиля зазора [23] в последней конструкции (коммулятивное реле) электростатические силы достигают значений, в несколько раз больших по сравнению с этими силами в конструкции реле рис. 1, а.

Рассмотрим три конструкции резонаторов (рис. 2, а, б, в).

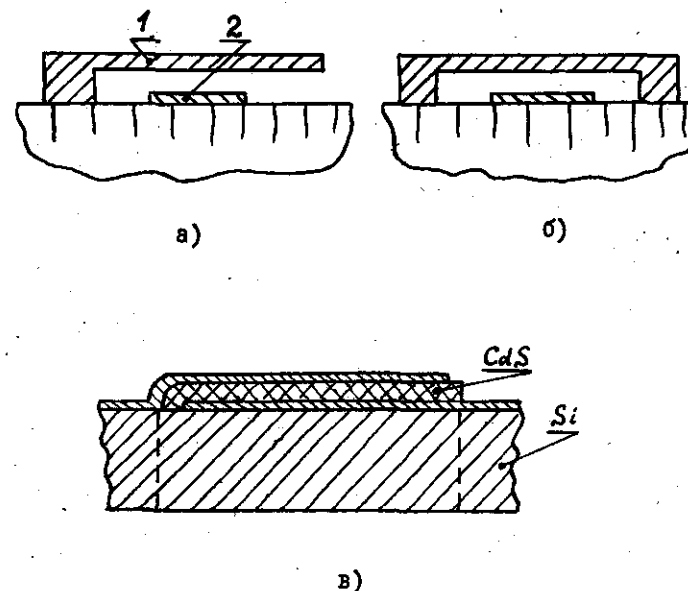


Рис. 2.

В конструкциях резонаторов с металлическими односторонне закрепленной (рис. 2, а) и с двусторонне закрепленной (рис. 2, б) пластинами 1 используются собственные частоты колебаний этих пластин. Возбуждение собственных колебаний производится элект-

ростатическими силами, возникающими в результате приложения периодически изменяющейся разности потенциалов между подвижными пластинами 1 и неподвижными пленочными электродами 2. Собственные частоты этих резонаторов практически не превышают >0 кГц при добротности около 400, температурный коэффициент частоты составляет около $3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ [26,27]. Для уменьшения его на порядок (до $(1,5 \pm 5) \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$) была предложена конструкция резонатора (рис.2,в), в которой колебания возбуждаются в кремниевой пластине, вырезанной в теле монокристаллической кремниевой пластины для интегральных схем. Эти колебания возбуждаются силами электрострикции, возникающими в пленке *Cds*, служащей изолятором пленочного конденсатора, расположенного на поверхности кремниевой пластины. Собственные частоты последних резонаторов имеют диапазоны: 50 кГц - 1 мГц при изгибных колебаниях пластины и 1 мГц - 100 мГц при их поперечных колебаниях; добротность достигает величин 1000 - 6000 [28].

Конструкция элемента пленочного модулятора света изображена на рис.3.

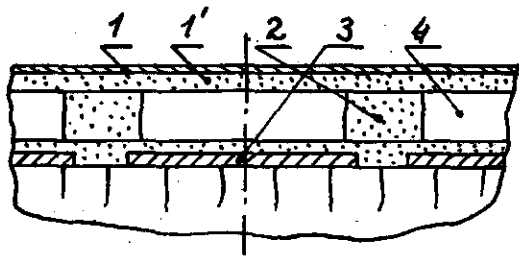


Рис. 3.

Пространственно-фазовая модуляция света в этом модуляторе достигается в результате управляемого прогиба металлизированной органической пленки 1-1', отражающей свет. В местах перфорации изоляционного слоя 5 мембрана прогибается за счет взаимного электростатического притяжения слоев металлизации 1 и пленочного электрода 2 [29,30]. Для двух одинаковых модуляторов при одной и той же разности потенциалов между слоями 1 и 2 характер прогиба мембраны будет разным в случае, если полость 8 со-

общается с окружающим объемом газа или не сообщается. В последнем случае на прогиб мембраны существенно влияет сжатие газа в объеме полости, так как электростатическое давление на мембрану не велико, и, согласно данным работы [5], оно не превышает величин 10^{-1} атм.

2. Напряжение управления электромеханических пленочных элементов

По данным работы [5] напряжения управления пленочных электростатических реле составляет около 20В; пленочные модуляторы требуют напряжения возбуждения 20-70В [26,27]; для резонатора (рис.2,в) напряжение возбуждения снижается до величин меньше 10В [28]; для пленочных модуляторов света характерны напряжения управления 10 - 50В [29,30]. Приведенные значения напряжений обусловлены всей совокупностью факторов, определяющих работу указанных элементов. С другой стороны, эти значения зачастую превышают необходимые напряжения, для непосредственного соединения электромеханических элементов и интегральных схем.

Снижение напряжений управления (срабатывания) пленочных реле обычной конструкции (рис.1,а), например, до 10В возможно, однако число переключений в таких реле будет весьма мало [5]. В то же время расчеты [16] в случае плоскопараллельного движения мембраны показывают, что при укреплении мембраны можно получить при напряжении срабатывания 10В достаточно большие силы разрыва и прижатия контактов. Предварительная оценка последних в зависимости от коммутируемых токов и напряжений была получена в работе [17].

В случае плоскопараллельного движения мембраны, как показывает расчет, даже идеально ровная в исходном положении мембрана при своем движении к тянущим электродам начинает поворачиваться вокруг своей продольной оси при некотором прогибе, приблизительно равном

$$w \approx \left[1 - \gamma^{\frac{2}{3}} \frac{0,66}{(1+S^2)^{\frac{1}{3}}} \right] d,$$

$$S = \frac{2\sigma^{1/2}h}{\sigma^{1/2}b}; \quad \eta = \frac{U_y}{U_{срб}}; \quad (1)$$

где h, b - толщина и ширина мембраны;

$$d = d_1 + \Delta/\epsilon;$$

d_1 - расстояние между мембраной и поверхностью диэлектриков, покрывающих тянущие электроды, в исходном положении;

Δ, ϵ - толщина и диэлектрическая проницаемость указанных диэлектриков;

G, σ - модуль сдвига и напряжение натяжения мембраны;

$U_y, U_{срб}$ - напряжения управления и срабатывания реле. Если при снятии напряжения управления в момент, предшествующий отрыву контактов, мембрана имеет перегиб δ - отклонение края мембраны относительно ее центра в месте контакта, то сила разрыва контактов будет

$$P = P_k \left[1 - \frac{1}{3} (2 - S^2) \frac{\delta}{d_k} \right]; \quad P_k = \frac{4h\sigma b d_k}{L}, \quad (2)$$

где d_k - ход контактов, L - длина мембраны.

Формулы (1) и (2) следуют из анализа уравнения кручения мембраны вокруг своей продольной срединной оси, которое имеет вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \alpha^2 \varphi = 0,$$

$$\alpha = \frac{\epsilon_0^{1/2} U b}{2 G^* d^{3/2} h^{3/2}}; \quad G^* = G \left(1 + \frac{b^2 \sigma}{4 h^2 G} \right),$$

при граничных условиях $x=0, \varphi=0$; $x=L, \varphi=0$.

Из (1) следует, что при не очень больших S и достаточно больших η поворот мембраны при включении реле может начаться весьма рано. При этом величина δ может оказаться близкой к величине d_k и сила разрыва контактов, согласно (2), будет равна приблизительно 1/3 рассчитанной для случая плоскопараллельного движения мембраны.

Из проведенного анализа следует, что достаточно большие

силы разрыва контактов при малых напряжениях срабатывания, согласно (2), при $S \geq 2$ можно получить, увеличивая толщину h мембраны и уменьшая величину ее натяжения σ . Как известно [5], напряжение срабатывания пропорционально величине $(\sigma h)^{1/2}$, а, согласно (2), силы разрыва контактов пропорциональны величине σh , то есть при условии $\sigma h = \text{const}$ можно достичь устойчивой работы реле при неизменных остальных его параметрах.

Все сказанное выше имеет отношение и к угловым реле (рис. 1, б), разумеется, при некотором уточнении формулы (1). Но угловые реле имеют существенно больший запас сил разрыва контактов при равных напряжениях срабатывания угловых и обычных реле. Например, согласно расчету работы [23], при напряжении срабатывания 10 в (реле, имеющие длину мембраны 2000 мкм; $b = 100$ мкм; $\sigma h = 400$ н/м) сила разрыва контактов для углового реле составляет 25 мН ($d_{\max} \approx 4,7$ мкм), а для обычного только 7,5 мН ($d_{\max} \approx 1,4$ мкм).

Напряжения возбуждения пленочных резонаторов с металлическими резонирующими пластинами (рис. 2, а, б) весьма велики (20 - 70 в), что, естественно, затрудняет их применение при использовании транзисторных схем управления [28]. С другой стороны, большие зазоры (8 - 10 мкм) в этих резонаторах [27] при нормальном давлении газа окружающей среды обуславливают достаточно высокие значения добротности, которая выражается формулой

$$Q = \left(Q_1^{-1} + \frac{\beta_2}{m_0 \omega} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где Q_1 - внутреннее трение резонирующих пластин;

$$\beta_2 = \begin{cases} 3/2 \eta \frac{b^2}{d^3}, & \lambda \ll d; \\ 1/3 \rho_2 \bar{v}, & \lambda \gg d; \end{cases}$$

- коэффициент, характеризующий трение в газе; $\eta, \rho_2, \bar{v}, \lambda$ - вязкость, плотность, средняя тепловая скорость, средняя длина пробега молекул газа, соответственно; $m_0 = \rho h, \rho$ - плотность материала мембраны; $\omega = 2\pi f$; f - резонансная частота колебаний пластины. Величина $Q_2 = \omega \eta / \beta$ для данных работы [27] ($d = 8-10$ мкм; $h = 10$ мкм; $f = 7-24$ кГц; материал пластины - золото; $b = 100$ мкм) при нормальном давлении газа ($\lambda \ll d$) и

для случая разряжения газа, окружающего резонатор ($\lambda \gg d$), соответственно будет

$$Q = \begin{cases} 50 - 150, & p \gg 7,6 \text{ торр;} \\ (50 - 170) \frac{p_n}{p}, & p \ll 7,6 \text{ торр;} \end{cases}$$

где p_n, p — нормальное и действительное давления газа. В работе [27] экспериментально получено значение $Q = 60 - 100$ (для нормального давления газа). Величина Q может быть оценена несколькими сотнями [31]. Из приведенных расчетов и сопоставлений можно утверждать, что во-первых, при указанных размерах резонаторов и при нормальном давлении газа их добротность определяется трением в газе (воздухе); во-вторых, при таком разряжении газа, окружающего резонатор, когда $\lambda \gg d$, добротность резонатора определяется трением не в газе, а в самом материале мембраны.

Итак, для получения достаточно высоких значений добротности необходимо, чтобы уменьшение зазора, понижающего напряжение возбуждения резонатора, сопровождалось соответствующим разряжением газа вокруг него.

Как указывается в работе [28], для резонаторов конструкции рис. 2, в требуются напряжения возбуждения, не превышающие 10 в, следовательно, в этом случае не возникает серьезной проблемы их снижения.

Допустимые напряжения управления пленочных модуляторов света могут быть разными в зависимости от применения одного из трех способов управления: применения координатных шин; воздействия электронным лучом с обратной стороны подложки [29]; использования электрографии [29]. При любом из указанных способов для снижения напряжения необходимо, чтобы пленка модулятора выполнялась из органического вещества, т.к. в этом случае модуль Юнга на два порядка меньше, чем для пленки из металлов. При любом из указанных способов управления высокие напряжения управления недопустимы по крайней мере из-за пробоя изоляционных слоев.

3. Надежность электромеханических пленочных элементов

Во всех рассматриваемых конструкциях пленочных механических элементов не используются детали, подвергавшиеся трению.

Известно [32,33], что в этих условиях заданная надежность элементов, подвергавшихся постоянной или переменной нагрузке, определяется соответствующими ограничениями на величины напряжений релаксации, усталости. Процессы прочности, ползучести, релаксации и усталости в пленках изучены не так основательно, как в монолитных материалах, тем не менее приведенные исследования [34-39] выявили значительное улучшение указанных свойств в пленках соответствующих веществ. Теперь хорошо известно (см. [34,35]), что прочностные свойства пленок лучше соответствующих свойств массивных материалов, что скорости ползучести пленок медленнее (на порядок и более), чем те же скорости для отожженной [37] и наклепанной меди [38]. Исследования усталости показали, что пленки никеля, например, имеют предел усталости $28-42 \text{ кг/мм}^2$, превышающий предел усталости как отожженных (18 кг/мм^2), так и холоднодеформированных (28 кг/мм^2) массивных образцов никеля.

Как показали данные [40,41], надежность электромеханических пленок существенно зависит от толщины диэлектрических слоев. В то время как другие же параметры электромеханических элементов в такой степени от толщины этих пленок не зависят. Это позволяет применять в электромеханических элементах более толстые пленки, чем, например, на затворах МОП-транзисторов.

Исследования эрозии контактов пленочных реле [20] показали, что их износ удовлетворительно описывается данными по мостиковому переносу и переносу материала искровым разрядом [42]. Исследования числа переключений и сбоев пленочных реле [5,17,20,21] показывают сопоставимость этих данных с соответствующими данными для маломощных реле при тех же условиях.

4. Частотные свойства электромеханических пленочных элементов

Максимальные частоты переключения пленочных электростатических реле при $L = 2$ мм, $\delta = 100$ мкм и нормальном давлении газа, окружающего мембрану, составляют $1 - 10$ кгц. Длительности времен включения и выключения составляют около 10 мксек и сильно зависят от отношения напряжения управления к напряжению срабатывания реле. Длительности времени включения и выключения таких реле снижаются соответственно до $8 - 10$ и $5 - 6$ мксек при снижении давления газа до $3-4$ мм рт.ст. При дальнейшем снижении давления отчетливо проявляется дребезг контактов [6].

Максимальные значения первых гармоник собственных частот резонаторов с металлическими резонирующими пластинами при их двустороннем закреплении ($L = 0,39$ мм) составляют около 30 кгц [27]. Практический предел [28] значений собственных частот для этих резонаторов ограничен 50 кгц. Как уже отмечалось (см. [28]), при колебаниях изгиба кремниевой пластины резонатор имеет диапазон частот от 50 кгц до 1 мГц, при колебаниях по толщине той же пластины — до 100 мГц.

Собственные частоты колебаний мембран пленочных модуляторов света составляют единицы, десятки мГц ($\delta = 50-100$ мкм) и соответствующие времена переключения $500 - 50$ нсек [29,30].

Из приведенных данных видно, что пленочные электромеханические элементы обладают достаточно высокими скоростными и частотными данными, которые в большинстве случаев несопоставимы с соответствующими данными обычных электромеханических элементов, так как улучшение скоростных и частотных свойств пленочных элементов объясняется их значительно меньшими габаритами по сравнению с габаритами монолитных элементов. Преимущество пленочных электромеханических элементов проявляется еще в том, что в них можно использовать трение в газе для создания демпфирования мембран [5,6], необходимого для реле и модуляторов, причем это демпфирование можно регулировать, изменяя давление газа или характерные размеры (δ , α). Наиболее выгодно при этом обеспечить такое демпфирование, чтобы режим давления мембран был близок к переходу от апериодического к колебательному, так как в этом случае напряжения управления не зависят от частоты,

до значения, приблизительно равного первой собственной частоте, и лишь при более высоких частотах для переключений требуется приблизительно пропорциональное увеличение этих напряжений.

5. Электромеханические пленочные элементы памяти

Хорошо известно [43], что одними из наиболее ценных элементов автоматики являются различные поляризованные реле, которые благодаря свойству сохранять свое состояние и при выключении источника управления, устанавливают гальваническую связь на выходе при гальванической развязке входных и выходных цепей. Такие элементы в микроминиатюрном и интегральном исполнении найдут широкое применение и в микроэлектронике [44]. В этой связи в работах [4,10] рассматриваются перспективы построения аналогичных электромеханических элементов на основе пленок.

В работе [10] показано, что удельные силы притяжения двух одинаковых высококоэрцитивных магнитных пленок имеют значения, не меньшие тех, которые достигаются в пленочных электростатических реле. Представляет интерес оценить и абсолютные значения этих сил. Согласно [10], эти значения могут быть определены так:

$$F = \rho \delta L = B_z H_c \delta L \approx 2 A \delta L, \quad (4)$$

где $\rho = \frac{\mu_0 H_c^2}{2}$; $\delta_{min} = \frac{2 \delta B_z}{\mu_0 H_c}$; H_c , B_z — коэрцитивная сила и остаточная индукция; A — удельная магнитная энергия.

Согласно [43], для самых хорошо известных высококоэрцитивных сплавов $A = 700 - 26000$ Дж/м³. Если принять $\delta = 10$ мкм и $L = 2$ мм, то, согласно (4), $F = 3 - 100$ мГ. Этих сил вполне достаточно, чтобы обеспечить необходимые силы притяжения пленочных контактов [19] и их размыкания [17]. Так как для перемagnичивания высококоэрцитивных пленок требуются большие токи (I_a), то для переключений реле в [10] предлагается использовать электростатический привод.

Итак, из приведенного анализа свойств электромеханических пленочных элементов видно, что они позволяют решать определенные важные задачи микроэлектроники, а их выявившиеся недостатки в значительной мере могут быть устранены.

1. ДЯТЛОВ В.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатические реле, Авт.св. СССР № 204440, Бюллетень № 22, 20.X.1967.
2. ДЯТЛОВ В.А., ЕВРЕЙНОВ Э.В., СТЕРЕЛЮХИН В.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле, Авт.св. СССР № 226034, Бюллетень № 28, 05.IX.1968.
3. ДЯТЛОВ В.А., ПОТАПОВ Б.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С., СОХИН А.А. Электростатическое реле, Авт.св. СССР № 292198, Бюллетень № 4, 06.I.1971.
4. ДЯТЛОВ В.А., ДЕМЕНТЬЕВ С.К., ДАНИЛЕВСКИЙ В.А., МАРКОВ Г.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Поляризованное реле, Авт.св. СССР № 236645, Бюллетень № 7, 03.II.1969.
5. ДЯТЛОВ В.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые результаты исследований пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам, Новосибирск, 1968, вып. 5, стр. 159-175.
6. ИГНАТЕНКО П.С., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Экспериментальное исследование импульсных характеристик пленочных электростатических реле. Влияние давления газовой среды на динамику процессов в пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Материалы ко II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, стр. 60-63, 64-67.
7. ДЯТЛОВ В.А., СОЛДАТЕНКОВ И.С., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ЧЕРЕПОВ Е.И. Некоторые пути улучшения характеристик пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", материалы II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, стр. 68-71.
8. ДЯТЛОВ В.А., ПЬЯНКОВ В.А., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Некоторые результаты расчета статических характеристик пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Материалы II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, стр. 72-75.
9. ДЯТЛОВ В.А., ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С. Об использовании полупроводниковых материалов в контактах пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Материалы II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, стр. 76-79.
10. ДЯТЛОВ В.А. Силы магнитостатического взаимодействия магнитных пленок. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 4, стр. 59-62.
11. СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые особенности работы пленочных электростатических реле в условиях вакуума. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 3, стр. 160-161.
12. ЛУКЬЯНОВА Р.Г., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Расчет статистических параметров механической модели пленочного электростатического реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1970, вып. № 40, стр. 3-50.
13. ДЯТЛОВ В.А., ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., РОГАЛЕВ А.И. Основные параметры пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 3-7.

14. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С. Статистические характеристики пленочных электростатических реле с выступающим контактом. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 8-13.

15. ФАДЕЕВ С.И. Метод расчета статистических параметров пленочного электростатического реле на ЗВМ. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 14-19.

16. ПОЛИНА Т.В., ПОТАПОВ Б.С., СТЕРЕЛЮХИН В.А., РОГАЛЕВ А.И. Упрощенные формулы для расчета пленочного электростатического реле на заданные параметры. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 20-23.

17. АБРАМОВ Г.А., ПОТАПОВ Б.С., СТЕРЕЛЮХИН В.А., РОГАЛЕВ А.И. Об измерении сил размыкания контактов пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 24-27.

18. ЛИГАЕВА Э.А., НУДЕЛЬМАН А.М., РОГАЛЕВ А.И. Сопротивление контактной цепи пленочных электростатических реле на постоянном токе. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 28-32.

19. КОНЫШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Переходное сопротивление пленочных контактов при малых контактных усилиях. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 33-36.

20. КОПЫТКОВ Н.Ф., ПОТАПОВ Б.С. Осциллографическое исследование процесса размыкания пленочных контактов. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 37-41.

21. ВОРОНИН В.Н., СТЕРЕЛЮХИН В.А., ЧЕРЕПОВ Е.И. Некоторые характеристики пленочного электростатического реле с нормально замкнутым контактом. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 42-44.

22. КОНЫШКИН В.В., ПОЛИНА Т.В., СОХИН А.А., СТЕРЕЛЮХИН В.А. Конструктивные пути улучшения характеристик пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 45-47.

23. ДЯТЛОВ В.А., ПЬЯНКОВ В.А. Исследование влияния формы зазора на основные характеристики пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 48-52.

24. КОЛОСАНОВ В.А., СОЛДАТЕНКОВА В.В., ФОНИН Б.И., ЧЕРЕПОВ Е.И. Некоторые вопросы технологии многослойных пленочных структур с микровозорами. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 53-55.

25. СОЛДАТЕНКОВ И.С. Некоторые вопросы изготовления пленочных электростатических реле. - "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 46, стр. 56-59.

26. НАТАНСОН, НЬЮЭЛ, УИЕСТРОМ. Транзистор с резонансным затвором, "Электроника", русский перевод, 1965, т. 38, № 19, стр. 3-7.

27. НАТАНСОН, НЬЮЭЛ, УИЕСТРОМ. - "Электроника", экспресс-информация, М., ВИНТИ, 1967, № 31, стр. 12-23.

28. НЬЮЭЛЛ, УИКСТРОМ. Туннстор-механический резонатор для микроминиатюрных схем.- "Зарубежная радиоэлектроника", 1971, "Сов. радио", № 2, стр. 114-123.
29. Радиоэлектроника за рубежом, экспресс-информация, 1969, № 45, стр. 3-9.
30. ПРЕСТОН. Мембранный световой модулятор и его применение в оптических ЦВМ.- "Зарубежная радиоэлектроника", 1970, № 10, стр. 112-116.
31. ПОСТНИКОВ В.С., БЕЛОНОВОВ В.К., ЗОЛОТУХИН И.В. Внутреннее трение и модуль упругости тонких пленок серебра, ФММ, 1967, т. 23, вып. 5, стр. 946-947.
32. ГАРОФАЛЛО. Законы ползучести и длительной прочности металлов, М., "Металлургия", 1968.
33. КЕННЕДИ. Ползучесть и усталость в металлах, Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1962, перевод: М., "Металлургия".
34. ГОФФМАН. Механические свойства тонких конденсированных пленок.- "Физика тонких пленок", М., "Мир", 1968, т. 3, стр. 225-298.
35. ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.В. Связь механических свойств со структурой конденсированных пленок меди.- "Физика металлов и металловедение", 1970, № 5.
36. ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.В. Закономерности ползучести конденсированных пленок меди, ПМТФ, 1971, № 3.
37. WYATT. Transient Creep in Pure Metals, Proc. Phys. Soc., v. 66B, p. 469-480.
38. DAVIS, Pittsburgh. Creep and Relaxation of Oxygen-Free Journal of Applied Mechanics, vol. 10, N 2, June 1943, p. 1-101-105.
39. ПАЛАТНИК Л.С., ИЛЬМИНСКИЙ А.И. УФН, 1968, т. 95, вып. I, стр. 613.
40. КОСЦОВ Э.Г. О нарушении электрической прочности диэлектрических пленок.- "Вычислительные системы", Новосибирск, "Наука" СО, 1968, вып. № 29, стр. 171-182.
41. МИХАЙЛОВСКИЙ И.П. Об одной закономерности распределения катастрофических отказов тонкопленочных конденсаторов во времени.- "Вычислительные системы", Новосибирск, 1971, вып. № 43, стр. 155-159.
42. ХОЛЫМ Р. Электрические контакты. М., ИЛ, 1961.
43. ВИТЕНБЕРГ М.И. Расчет электромагнитных реле, М.-И., "Энергия", 1966.
44. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности, Новосибирск, "Наука", 1966.

Поступила в редакцию
13.1.1972