

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РЕЛЕ

В.А. Дятлов, И.С. Солдатенков
(Новосибирск)

Электростатические реле были предложены на заре развития автоматики [1,2]. Простейшая его конструкция изображена на рис. 1.



Рис. 1. Простейшая конструкция электростатического реле.

Различные конструкции электростатических реле описаны в ряде отечественных и зарубежных авторских свидетельств и патентов [3,4,5,6,7]. Особо следует выделить большое число предложений Гончарского Л.А. [5,6,7], сделанных в 1934–1936 годах. Гончарский Л.А., в частности, предложил применять в качестве некоторых конструктивных материалов реле металлические пленки [5]. В последствии описал пленочное электростатическое реле Шолдерс [8]. Шолдерс утверждает о возможности создания пле-

ночного электростатического реле внутри цилиндрической полости в подложке; полость имеет диаметр один микрон, закрыта гибкой металлической пленкой толщиной 1000 \AA , способной иметь прогиб около 1000 \AA до достижения контакта. По его расчетам такое реле должно срабатывать при напряжении 30 в. Таким образом, в работе Шолдерса конструкция пленочного электростатического реле рассматривается в самых общих чертах.

Обычные электростатические реле не нашли больших применений из-за необходимости использования больших напряжений ($\sim 1000 \text{ в}$) и из-за целого ряда сопутствующих этому неблагоприятных обстоятельств (высокие напряжения на контактах, большие расходы энергии, залипание контактов и т.д.). Не привело к положительным результатам и уменьшение жесткости гибкого элемента при использовании электростатического притяжения гибкой пластины с двух сторон (рис. 2), хотя при такой конструкции

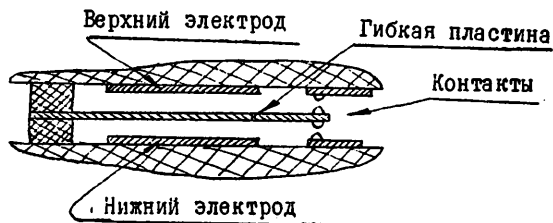


Рис. 2. Электростатическое реле при использовании двустороннего притяжения гибкой пластины.

удалось в некоторой степени уменьшить залипание контактов, которое уже невозможно преодолеть при пластинах малой жесткости и при одностороннем притяжении [3]. Основной недостаток обычных электростатических реле — малые силы притяжения пластин (при зазорах до 100 микрон) — определил, в конечном итоге, плохие эксплуатационные характеристики этого вида реле и ограничил их применение, в основном, область высоковольтной техники [1].

Не были получены удовлетворительные результаты при применении в качестве одного из тянущих электродов полупроводниковых пластин, к которым гибкая пластина прижималась вплотную. Эффективный зазор оказывался весьма малым, а токи утечки ограничивались сопротивлением полупроводника и малой реальной

площадью соприкосновения, однако, характеристики этих реле оказались очень чувствительны к изменениям температуры, к пыли, влаге и т.д. [1].

Череповым Е.И. и авторами была предложена конструкция плёночного электростатического реле [9], которая лишена указанных выше недостатков обычных электростатических реле (рис.3).

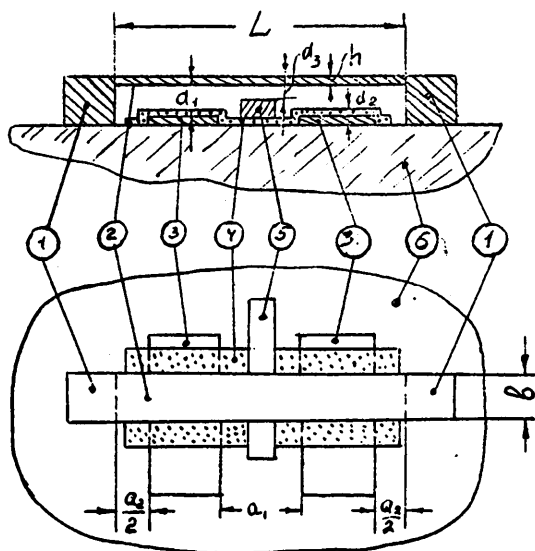


Рис. 3. Конструкция плёночного электростатического реле.

Основной отличительной особенностью предложенного плёночного электростатического реле является то, что гибкая пленка выполнена в виде мембраны - она закреплена на двух концах и находится в натянутом состоянии. Такое выполнение основного элемента реле позволяет достичь главного - очень малых зазоров между взаимно притягивающимися электродами, одним из которых является сама гибкая пластина. Предварительный натяг позволяет стабилизировать величину зазоров даже при их значениях порядка 1 микрона и меньше, что и было доказано экспериментально.

Остальные особенности плёночного электростатического реле являются следствием первой особенности - вырез в неподвижной пластине сделан в её средней части, где расположен выступающий неподвижный контакт. Кроме того, для устранения

закорачивания притягивающихся электродов применена изолирующая пленка, покрывающая неподвижные электроды. Так как при заданном напряжении электростатические силы взаимодействия обратно пропорциональны квадрату величины зазора, то его уменьшение от 100 микрон до 1 микрона принципиально позволяет увеличить силы притяжения в 10^4 раз. В таком увеличении электростатических сил нет необходимости, поэтому становится возможным как уменьшить напряжение срабатывания, так и увеличить жесткость гибкой пластины за счет её закрепления на двух концах.

До настоящего времени в литературе не приведены ни расчётные, ни экспериментальные данные по пленочным электростатическим реле. В этой связи в настоящей работе приводятся некоторые результаты расчётов и некоторые экспериментальные характеристики этого нового элемента. При этом главное внимание уделяется статическим и квазистатическим характеристикам.

1. Результаты расчётов статических и квазистатических характеристик пленочных электростатических реле

А. Движение элементов гибкой пластины под действием сил электростатического притяжения может быть описано следующим уравнением в частных производных, которое может быть получено согласно, например, работы Тимошенко и Войновского - Кригера [10], с учетом членов отражающих инерцию и трение, в следующем виде:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{1}{D} \left(p + N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial w}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где: x - координата вдоль длины гибкой пластины;

t - время;

$w(x, t)$ - прогиб гибкой пластины;

$p(x, w)$ - величина сил электростатического притяжения на единицу площади гибкой пластины;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)};$$

h - толщина гибкой пластины;

E - модуль Юнга;

μ - коэффициент Пуассона;

$$m_0 = \rho \cdot h;$$

ρ - удельная масса материала пластины;

$$N = N_0 + \frac{Eh}{2L(1 - \mu^2)} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (2)$$

N - сила натяжения гибкой пластины на единицу её ширины;

$N_0 = \sigma_0 \cdot h$ - сила натяжения гибкой пластины в её начальном положении;

σ_0 - нормальное напряжение в пластине в её начальном положении.

Второй член в выражении для N характеризует дополнительное натяжение гибкой пластины при её прогибах.

Приближенное выражение для величины β получено Гариповым Р.М. (частное сообщение) для случая, когда длина свободного пробега молекул газа меньше или порядка величины зазора:

$$\beta = \eta \frac{b^2}{(d_1 - w)^3}, \quad (3)$$

где η - коэффициент вязкости газа;

b - ширина гибкой пластины;

d_1 - величина зазора в исходном положении гибкой пластины.

Обозначения размеров всех элементов пленочного электростатического реле приведены на рис. 3.

Выражение для величины сил электростатического притяжения может быть получено [II] в следующем виде (при заданной величине напряжения u):

$$p = \frac{\epsilon_0 u^2}{2[d - w]^2}, \quad (4)$$

при

$$\frac{L}{2} - \frac{a_2}{2} > |x| > \frac{a_1}{2};$$

$$p = 0,$$

при

$$|x| \leq \frac{a_1}{2},$$

$$\frac{L}{2} \geq |x| \geq \frac{L}{2} - \frac{a_2}{2},$$

где

$$d = \frac{d_2}{\epsilon} + d_1;$$

ϵ - величина относительной диэлектрической проницаемости плёнки, покрывающей неподвижные пластины;

$$\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м.}$$

Статическое поведение гибкой пластины, согласно (I), выражается уравнением:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{D} \left(p + N \frac{d^2 w}{dx^2} \right). \quad (5)$$

Ниже будет показано, что при правильном конструировании плёночного электростатического реле силы изгиба и силы дополнительного натяжения при прогибе играют небольшую роль, в связи с чем уравнение (5) можно упростить и выразить так:

$$\frac{a}{(d - w)^2} + \frac{d^2 w}{dx^2} = 0, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{\epsilon_0 u^2}{2N_0},$$

при

$$\frac{L}{2} - \frac{a_2}{2} > |x| > \frac{a_1}{2};$$

$$c = 0,$$

при

$$|x| \leq \frac{a_1}{2}, \quad \frac{L}{2} \geq |x| \geq \frac{L}{2} - \frac{a_2}{2}.$$

Граничные условия для уравнения (6), при жестком закреплении краёв гибкой пластины, будет иметь вид:

$$w = 0 \quad \text{при} \quad |x| = \frac{L}{2}.$$

Из решения уравнения (6) при заданных граничных условиях можно получить следующую систему уравнений:

$$u_0 = \sqrt{2} \left[\sqrt{1 - z_3} \cdot \sqrt{z_2 - z_3} \cdot \sqrt{1 - z_2} + (1 - z_2) \cdot \sqrt{1 - z_2} \operatorname{Arc th} \sqrt{\frac{1 - z_3}{z_2 - z_3}} \right] \quad (7)$$

$$u_0 = \sqrt{2} \cdot q \left[\frac{z_3 \sqrt{1 - z_2} \cdot \sqrt{1 - z_3}}{\sqrt{z_2 - z_3}} \right] \quad (8)$$

где

$$u_0 = \frac{\sqrt{\sigma_0} (L - a_1 - a_2) u}{\sqrt{2} d^{3/2} h^{1/2} \sqrt{\sigma_0}},$$

$$q = \frac{L - a_1 - a_2}{a_2},$$

$$z_2 = \frac{w_{\max}}{d}.$$

w_{\max} - величина прогиба гибкой пластины в месте контакта.

При исключении из уравнений (7) и (8) величины z_3 можно получить зависимость $u_0(z_2)$ при $q = \text{const}$ (рис. 4), устанавливающей связь между напряжением и прогибом гибкой пластины в её центре.

По зависимости $u_0(z_2)$ при $q = \text{const}$ определяются напряжения срабатывания и отпускания реле, величины перемещений при которых будет либо гистерезисный процесс замыкания - размыкания, либо - безгистерезисный и т.д.

Напряжения срабатывания и отпускания могут быть определены следующим образом. Для конкретных параметров реле, согласно графикам рис. 4, определяется соответствующая зависимость $u_0(z_2)$ и величина $z_{2\text{опор}} = \frac{d_1}{d}$, которая в долях d отражает величину прогиба гибкой пластины до замыкания контакта. При этих данных напряжения срабатывания $u_{\text{ср}}$ и отпускания $u_{\text{отп}}$ могут быть определены согласно рис. 5. Очевидно, что при $z_{2\text{опор}} > z_{2\text{max}}$, где $z_{2\text{max}}$ - значение z_2 соответствующее максимальному значению u_0 , режим замыканий - размыканий будет гистерезисным, а при $z_{2\text{опор}} < z_{2\text{max}}$ - безгистерезисным. Условие гистерезисного режима, учитывая значения $z_{2\text{max}} \approx 0,38$, выражается так:

$$d_2 < 1,64 \varepsilon d_1, \quad (9)$$

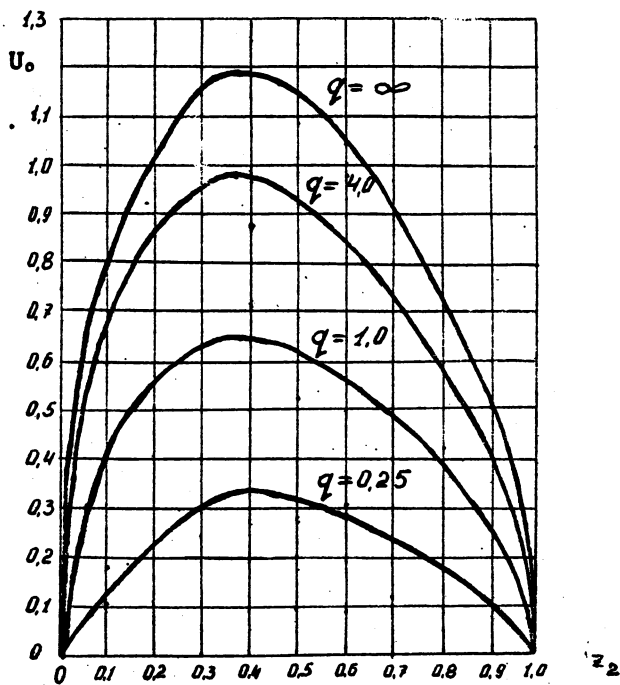


Рис. 4. Зависимость нормированных величин напряжения U_0 от максимального прогиба $z_2 = \frac{w_{\max}}{d}$.

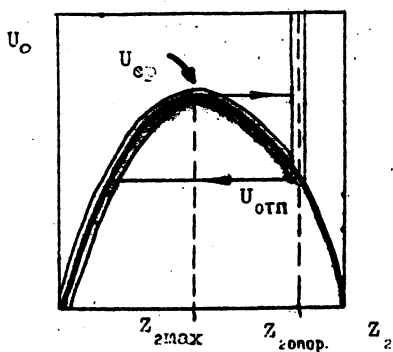


Рис. 5.

Определение напряжений срабатывания и отпусания.

а условие безгистерезисного режима - так:

$$d_2 > 1,64 \varepsilon d_1 \quad (10)$$

Из (10) следует, что для создания безгистерезисного режима работы реле требуется относительно большая толщина диэлектрической пленки d_2 покрывающей неподвижные пластины. При создании таких реле необходимо применять диэлектрические плёнки с малыми значениями ε .

Б. Механические напряжения в гибкой пластине существенно определяют срок службы реле. Величина σ_0 может быть разумно выдержана в процессе изготовления реле. Однако, дополнительные напряжения, возникающие при изгибе и при дополнительном растяжении, уже зависят от выбора соотношений размеров элементов реле. Величина суммарного напряжения (нормальные значения) была определена для самого опасного места гибкой пластины - места закрепления, исходя из уравнения (5), для случая, когда гибкая пластина плотно прилегает к диэлектрической пленке в местах расположения неподвижных электродов, что справедливо для достаточно больших напряжений u . Поэтому для этого случая уравнение (5) можно рассмотреть при условиях, которые согласно рис. 6 будут иметь вид:

$$x = 0, w = 0, \quad \frac{dw}{dx} = 0;$$

$$x = \frac{a_2}{2}, w = d_1, \quad \frac{dw}{dx} = 0; \quad p = 0.$$

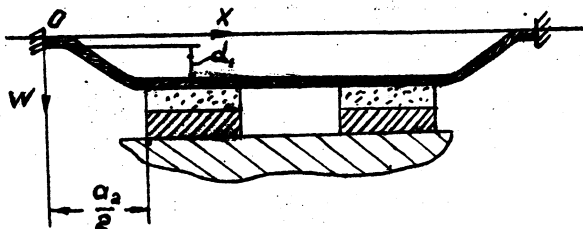


Рис. 6. Определение максимальных напряжений изгиба в пластине.

Решение (5) при указанных граничных условиях и при $p = 0$ не представляет труда и здесь приводятся результаты определения величины максимального суммарного нормального напряжения, состоящего из напряжения σ_0 напряжения изгиба $\sigma_{\text{и}}$ на краю гибкой пластины в месте закрепления и $\sigma_{\text{од}}$ - напряжения, возникающего благодаря дополнительному натягу пластины. Соответствующее выражение для этого напряжения имеет вид:

$$\sigma_{\text{max}} = (\sigma_0 + \sigma_{\text{од}}) \left(1 + s \frac{\sqrt{\sigma_{\text{од}}}}{\sqrt{\sigma_0 + \sigma_{\text{од}}}} \right), \quad (\text{II})$$

где

$$s = \sqrt{\frac{6L}{a_2}},$$

$$\sigma_{\text{од}} = \frac{2Ed^2}{La_2(1 - \mu^2)}.$$

Выражение (II) справедливо при условии, что величина

$$\frac{a_2}{2h} \sqrt{\frac{3(1 - \mu^2) \sigma_0}{E}} \gg 1.$$

Анализ (II) показывает, что для выбранных размеров реле, результаты испытаний которых приводятся в настоящей работе, величина $\sigma_{\text{max}} \approx \sigma_0$ и выполняется предыдущее неравенство. Это означает, что силами изгиба и дополнительным натяжением можно пренебрегать, что и было сделано ранее при определении статических характеристик реле.

В. Задача определения динамических характеристик пленочного электростатического реле весьма сложна, так как она связана не только с необходимостью решения нелинейных уравнений в частных производных, но и с необходимостью уточнения процессов демпфирования гибкой пластины в газе, а также с необходимостью учёта внутреннего трения в самой гибкой пластине. Однако, могут быть довольно просто определены собственные частоты колебаний гибкой пластины при пренебрежении силами изгиба, что как уже говорилось, допустимо. При этом собственные частоты определяются по формуле:

$$f_n = \frac{(2n - 1)}{2L} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}}, \quad (\text{I2})$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$

Величина времени срабатывания реле может быть сделана за

счёт подбора условий демпфирования порядка $1/f_1$,
где

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}} \quad (13)$$

Ниже будет проведен анализ полученных формул и графиков при оценках перспектив плёночных электростатических реле.

II. Результаты экспериментального определения основных параметров плёночных электростатических реле

Вид сверху образца плёночного электростатического реле при двадцатикратном увеличении показан на фотографии (рис.7). Основные размеры испытываемых элементов следующие: $h = 1,2 \pm 1,3$ микрона, $L = 2$ мм, $a_1 = 0,4$ мм, $a_2 = 0,3$ мм, $b = 0,1$ мм, $d_1 = 1,5 \pm 3$ микрона, $d_2 = 0,3$ микрона; ширина контакта (элемент 5 на рис. 3) $0,1$ мм и он выступает над поверхностью ди-

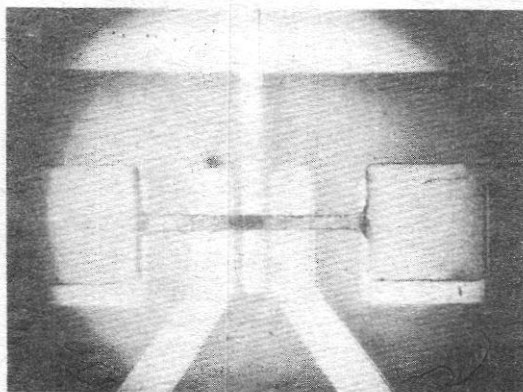


Рис. 7. Фото плёночного электростатического реле.

электрической пленки, расположенной над тянущим электродом, приблизительно на $0,4$ микрона. Экспериментальные данные приведены для следующих материалов, элементов реле:

- 1) Гибкая пластина - алюминий;
- 2) Диэлектрическая плёнка - монооксид кремния;
- 3) Контактный электрод - титан;
- 4) Материал подложки - стекло для фотопластин.

Образцы испытывались в атмосфере "аргона чистого" марки "А" при избыточном давлении в одну атмосферу.

Результаты испытаний ряда образцов сведены в таблицы I, II. В этих таблицах: R_H - сопротивление, включённое последовательно с контактами; u_k - напряжение на контактах, u_{cp} - напряжение, при котором замыкаются контакты; T_{cp} - время испытания;

N - общее число срабатываний; $k_B = \frac{u_{cp}}{u_{отп}}$ - коэффициент возврата, $u_{отп}$ - напряжение, при котором размыкаются контакты. Нумерация образцов следующая: основная цифра - номер подложки, индекс - номер образца на подложке.

Т а б л и ц а I

Параметры номера образц.	R_H [ом]	u_k [в]	i [гц]	u_{cp} [в]	T_{cp} [мин]	N	Примечание
20 ₃₃	$\frac{3 \cdot 10^6}{10^4}$	3	$\frac{200}{2000}$	20	$\frac{85}{8,5}$	$1,8 \cdot 10^6$	Образец остался годным
39 ₂₃	$3 \cdot 10^6$	3,5	$\frac{200}{600}$	22	$\frac{8}{7}$	$3,5 \cdot 10^5$	К концу испытаний увеличилось сопротивление контактов
39 ₂₂	$5 \cdot 10^4$	7	2000	60	5	$6 \cdot 10^5$	К концу испытаний наблюдалось увелич. сопротивления контактов и произошло их замыкание при увеличении напряжения на контактах.
10 ₂₂	$3 \cdot 10^6$	3,5	600	24	30	$1,08 \cdot 10^6$	Образец остался годным
10 ₂₃	$3 \cdot 10^6$	3,5	50	15	-	-	годен
10 ₃₁	$3 \cdot 10^6$	3,5	50	11	-	-	годен
39 ₃₁	$3 \cdot 10^6$	3,5	20	13	2	$2,4 \cdot 10^3$	К концу испытаний залипли контакты

Приведенные в таблице I данные получены на образцах, имеющих далеко не оптимальные материалы, геометрические размеры и некоторые другие параметры. Однако, они показывают, что отдельные образцы имеют достаточно большое число срабатываний, превышающее $1 \cdot 10^6$ раз. Осциллограммы изменения напряжения на контактах показывают полное отсутствие дребезга контактов, что связано с демпфированием гибкой пластины в результате трения в газе при нормальных давлениях. Этот факт иллюстрируется осциллограммами (рис. 8).

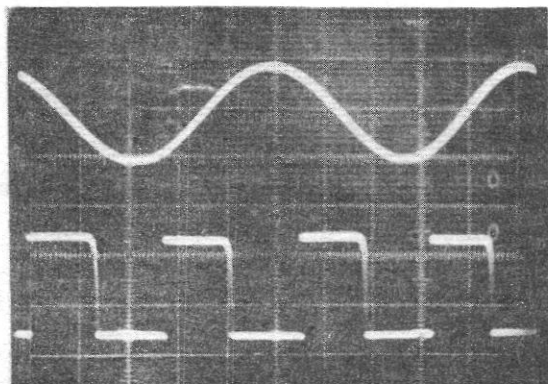


Рис. 8. Осциллограммы. Сверху — напряжения между гибкой пластиной и тянущими электродами, снизу — напряжение между контактом и гибкой пластиной. Нагрузка — активное сопротивление. Частота 200 гц.

При нормальных давлениях время замыкания контактов составляет единицы мксек, а время размыкания — десятки мксек.

В таблице 2 проведено сравнение некоторых экспериментальных и расчетных данных.

Напряжение срабатывания довольно точно определяется формулой, следующей из (8):

$$u_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2 \sigma_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{d^{3/2} \cdot h^{1/2}}{L - a_1 - a_2} u_0 \text{ ср } (q),$$

где $u_0 \text{ ср}$ — максимальные значения u_0 при $q = \text{const}$ на рис. 4.

Т а б л и ц а 2

Но- мер образ- цов	Пара- метры	u_{cp} [В] экспер.	k_B экспер.	d_1 [мк]	d_2 [мк]	q	$z_{опор}$	u_{cp} [В] расч.	k_B расч.	σ_0 [$\frac{MH}{M^2}$]
IO ₁₃										
IO ₂₃										
IO ₂₂		II+24	0,37 + ±0,4	3,0	0,27	4,3	0,95	20	0,28	40
IO ₃₁										

Величина k_B , полученная расчётом, несколько отличается от экспериментальных значений, что можно объяснить влиянием выступающей части среднего контакта, которая не учитывалась при расчетах.

III. Перспективы применения плёночных электростатических реле

На основе плёночных электростатических реле (ПЭР) могут быть изготовлены самые разнообразные элементы автоматики и вычислительной техники. Широкие возможности применения плёночных электростатических реле определяются тем, что на них могут быть изготовлены как логические элементы с необходимым усилением сигнала, так и элементы памяти. Возможные схемы логических элементов изображены на рис. 9. Элементы памяти на основе ПЭР могут быть созданы при использовании двух различных принципов — блокировки контактов или гистерезиса. Эти возможности определяются тем, что ПЭР могут быть изготовлены с самыми разнообразными значениями коэффициентов возврата. На рис. 10 изображены некоторые из возможных схем с использованием блокировки контактов (а) и гистерезиса (б). При использовании изолированных контактов на основе ПЭР могут быть созданы коммутаторы электрических цепей, что представляет большой интерес при создании элементов вычислительных сред.

Плёночные электростатические реле обладают гораздо большим набором возможных свойств по сравнению с любыми из известных элементов (транзисторы, полевые триоды и т.д.).

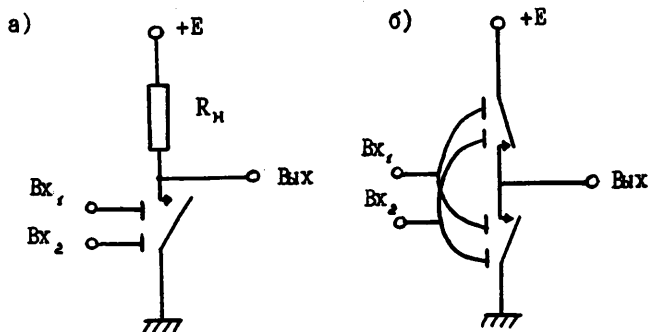


Рис. 9. Логические элементы на основе плёночных электростатических реле, а) обычная схема, б) схема на основе использования взаимно дополняющих реле.

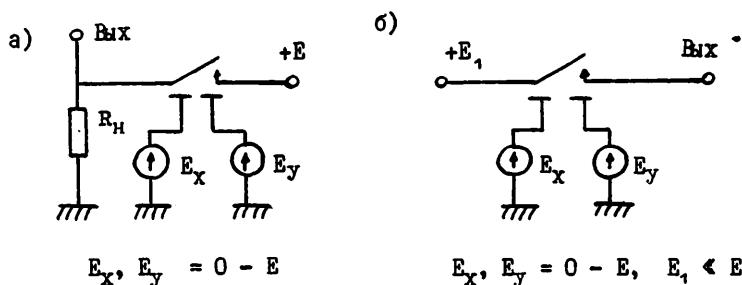


Рис. 10. Элементы памяти на основе плёночных электростатических реле, а) при использовании принципа блокировки контакта, б) при использовании гистерезиса.

В то же время по ряду параметров элементы на основе ПЭР будут обладать лучшими показателями по сравнению с широко применяемыми элементами на транзисторах, полевых триодах и т.д. благодаря исключительной экономичности ПЭР и гораздо лучшим ключевым свойствам. Особенно экономичными будут элементы с использованием дополняющих ПЭР вместо балластных сопротивлений (рис. 9б и рис. 10б). Потребление мощности этими элементами в статическом состоянии определяется прежде всего сопротивлени-

ем на квадрат подложки, которое может быть очень высоким. В то же время ПЭР имеют весьма малые значения напряжения срабатывания, что в свою очередь также определяет экономичность соответствующих схем. При подложках с большим сопротивлением на квадрат потребляемая ПЭР мощность в статическом состоянии может быть даже порядка 10^{-17} Вт [12], что гораздо лучше, чем у любых известных полупроводниковых элементов (транзисторы - 10^{-6} Вт, полевые триоды - 10^{-9} Вт). В динамических условиях ПЭР также потребляют незначительную мощность. Так, величина энергии, требуемая для срабатывания описанных выше ПЭР, имеющих довольно большие размеры, составляет $10^{-9} + 10^{-10}$ Дж. Эти значения энергий срабатывания такие же, как и у лучших современных полевых триодов.

В перспективе, при использовании плёнок толщиной порядка 0,1 микрон, ПЭР будут обладать напряжениями срабатывания порядка 1 вольта, а энергия срабатывания будет порядка $10^{-11} + 10^{-12}$ Дж. Эти значения уже близки к соответствующим значениям у криотронов ($10^{-12} + 10^{-14}$ Дж.). Применение плёночных электростатических реле может вообще снять энергетическую проблему при создании соответствующих устройств.

Пленочные электростатические реле обладают достаточно высокими скоростными свойствами. Так, собственные частоты гибкой пластины из алюминия (напряжение усталости $\sim 30 \cdot 10^6$ Н/м², $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$) будут равны:

$$f_{Al} = \frac{0,53 \cdot 10^2}{L [\text{м}]},$$

а пластины из тантала (напряжение усталости $200 \cdot 10^6$ Н/м², $\rho = 16,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$):

$$f_{Ta} = \frac{0,55 \cdot 10^2}{L [\text{м}]}.$$

Таким образом, время срабатывания ПЭР может быть порядка:

$$\tau \sim \frac{1}{f_1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ сек},$$

при $L = 10^{-3}$ м (1 мм) и порядка:

$\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ сек,
при $L = 10^{-4}$ м (100 мк).

Указанные параметры ПЭР в большинстве применений могут быть использованы при достижении числа срабатываний порядка 10^9 и вы-

ше. Число срабатываний ПЭР, как и известных реле, определяется свойствами контактов и механическими свойствами гибкой пластины. В перспективе, контактные свойства ПЭР могут быть значительно улучшены использованием идей, изложенных в работе Хольма [13], где указывается, что число срабатываний реле может быть значительно увеличено при применении для контактов материалов с насыщенными ковалентными связями (полупроводников).

В перспективе плёночные электростатические реле могут найти широкие и эффективные применения, в частности, для создания вычислительных сред высокой производительности.

Л и т е р а т у р а

1. Б.С. Сотсков. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. Госэнергоиздат, 1953.
2. Большая Советская Энциклопедия, издание второе, 3, 1957, ГНИ БЭС, стр. 621.
3. I.W.Diesel. Electrostatic controls. Патент США, № 2927255, 1960 (№ 1).
4. I.W.Diesel. Electrostatic controls. Патент США, № 2942007, 1960 (№ 3).
5. Л.А. Гончарский. Электростатическое реле. Авторское свидетельство СССР № 42215 Кл. 21g, 405, заявлено 17 окт. 1934 г.
6. Л.А. Гончарский. Электростатическое реле. Авторское свидетельство СССР № 45686 Кл. 21g, 405, заявлено 13 июля 1935 г.
7. Л.А. Гончарский. Электростатическое реле. Авторское свидетельство СССР № 52316, Кл. 21g, 405, заявлено 26 апреля 1936 г.
8. Kenneth Shoulders. Microelectronics using electron - beam - activated machining techniques. Advances in Comput. 1961, v.2, p.p. 195-289.
9. В.Л. Дятлов, И.С. Солдатов, Е.И. Черепов. Электростатическое реле. Решение о выдаче авторской справки по заявке № 1107498/26-24 от 12/X-1966 г. Авт.свид. СССР № 204440.- Изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1967, № 22, с.54.

10. С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. Пластинки и обложки. М., ГИФМЛ, 1963.
11. А.В. Нетушил, К.М. Поливанов. Основы электротехники, часть 3-я, М.-Л., ГЭИ, 1956.
12. Дж. Кей, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. М., ГИФМЛ, 1962, стр. 99.
13. Р. Хольм. Электрические контакты. М., ИЛ, 1961, стр.373.