

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77 : 002.5

ЁМКОСТНЫЕ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРЫ СВЕРХВЫСОКИХ УСКОРЕНИЙ

И. Л. Багинский, Э. Г. Косцов

*Институт автоматизи́ки и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Установлена возможность создания ёмкостного акселерометра для измерения сверхвысоких ускорений (до $10^6 g$ и более). Показано, что введение в межэлектродный зазор тонкой плёнки электрета с высоким потенциалом поверхности позволяет значительно расширить частотный и амплитудный диапазоны регистрации ускорений при уменьшении размера устройства по сравнению с известными МЭМС-акселерометрами сверхвысоких ускорений. Создана математическая модель электретного акселерометра для сверхвысоких ускорений и проведён анализ основных закономерностей его функционирования.

Ключевые слова: МЭМС-акселерометр, электростатика, электрет, сверхвысокие ускорения.

DOI: 10.15372/AUT20170314

Введение. Как известно, акселерометры, определяющие величину ускорения подвижных объектов, широко внедрены в различные технические устройства. С развитием технологии микроэлектромеханики всё большее распространение получили МЭМС-акселерометры (начиная с 2003 года они занимают второе место по объёму продаж после МЭМС-датчиков давления). Акселерометр включает в себя подвижный элемент с заданной массой и упругую пружину, при ускорении подвижный элемент смещается относительно несущей конструкции. Это смещение, пропорциональное внешнему ускорению, регистрируется в МЭМС-акселерометрах несколькими способами.

На сегодняшний день известен ряд физических принципов, на которых основано функционирование выпускаемых промышленно МЭМС-акселерометров, различающихся способами считывания сигнала при ускорении подвижной массы устройства: пьезоэлектрические [1–3], ёмкостные [4–6], пьезорезистивные [7–11], оптические и электромагнитные. Известен также и резонансный способ считывания сигнала, основанный на изменении частоты резонанса при воздействии ускорения на систему масса—пружина. Обзор этих способов приведён в работе [12].

В последнее время в связи с применением новых технических решений в военной и космической отраслях для определения условий создания максимальной безопасности при столкновениях всё большее внимание уделяется исследованию процессов при кратковременных и ударных перегрузках, сопровождаемых появлением высоких ускорений (до 10^4 – $10^5 g$ и более) в диапазоне времени 10^{-6} – 10^{-3} с. При указанных перегрузках большинство конструкций известных акселерометров разрушается, в то же время необходимо детальное описание процесса перегрузки (например, при проникновении тела снаряда, пули или ракеты через слой защиты), дающее информацию о качестве этой защиты.

В настоящее время для создания акселерометров, работоспособных при высоких перегрузках, в большинстве случаев используется пьезорезистивный (тензорезистивный) эффект [7], суть которого заключается в изменении электрического сопротивления материала под действием механических напряжений. Пьезорезисторы располагаются на поверхности конструкции, подверженной наибольшим механическим напряжениям (растяжению или изгибу), т. е. на упругом элементе, жёстко связанном с подвижной массой. Как правило, материалом для пьезорезистора служат тонкие плёнки поликристаллического кремния, обладающие высокой упругостью, в которых практически отсутствуют ползучесть и явления гистерезиса даже при высоком давлении. Кроме того, коэффициент тензочувствительности кремния значительно превышает этот коэффициент для тонкой металлической плёнки. Пьезорезистивные акселерометры имеют низкое выходное сопротивление, слабую чувствительность к электромагнитным помехам (~ 1 мкВ/ g) и достаточно технологичны. При их использовании достигнут верхний диапазон измерений величины ускорения (до $10^5 g$) в частотном диапазоне до 100 кГц.

Обычно тензорезисторы включаются по схеме моста Уитстона [8]. Максимальное выходное напряжение таких датчиков невелико (менее 100 мВ), и необходимо усиливать сигнал. Кремниевые резисторы обладают низкой температурной стабильностью, поэтому требуется применять специальные достаточно сложные схемы для температурной компенсации сигнала с его предварительной градуировкой.

Ёмкостный принцип работы МЭМС-акселерометра имеет ряд преимуществ перед другими принципами считывания из-за его более высокой чувствительности, низкого уровня шума, слабой температурной зависимости и возможности совмещения с интегральной КМОП-технологией [13].

В ёмкостных акселерометрах движение массы подвижной пластины (ПП) регистрируется через изменение ёмкости двух параллельных пластин-электродов: одна из них — подвижная, с заданной массой, вторая — стационарная. Как правило, используется дифференциальная ёмкостная схема считывания (ёмкость отсчитывается относительно обеих сторон ПП, при её смещении увеличивается ёмкость одного конденсатора и одновременно уменьшается ёмкость другого), что позволяет поддерживать линейность выходного сигнала и компенсировать шумовые сигналы, обеспечивая обнаружение очень малых смещений (в пределах долей нанометров).

Априори ясно, что при интенсивном внешнем воздействии амплитуда колебаний ПП в ёмкостном акселерометре должна быть минимальной, но обеспечивающей достаточный уровень сигнала, по предварительным оценкам эта амплитуда будет иметь нанометровый масштаб. Соответственно межэлектродный зазор должен быть минимальным (менее 1 мкм). Это обстоятельство необходимо учитывать при формировании достаточно высоких электрических полей в зазоре, когда вероятен его электрический пробой. Данными факторами объясняется отсутствие ёмкостных акселерометров, работоспособных при ускорениях более высоких, чем $100g$.

В [14] для повышения напряжения в межэлектродном зазоре ёмкостных преобразователей энергии, исключения его электрического пробоя описывалась возможность введения в межэлектродный зазор тонкой диэлектрической (сегнетоэлектрической) плёнки, обладающей высокой электрической прочностью.

Одними из очевидных требований к конструкции акселерометра являются обеспечение линейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по величине ускорения и демпфирование собственных колебаний осциллятора при воздействии импульсной нагрузки (ударе), при этом частота собственных колебаний подвижной массы акселерометра должна превышать частотный диапазон измеряемых ускорений [15].

В предлагаемой работе рассматриваются ёмкостные МЭМС-акселерометры, в которых в качестве диэлектрика применяется плёнка диэлектрика-электрета с параметрами,

обеспечивающими возможность создания в зазоре высокой напряжённости электрического поля. Ёмкостные электретные акселерометры известны, они предназначались для измерения малых значений ускорений [16, 17].

Цель данной работы — исследование особенностей функционирования ёмкостного электретного акселерометра со структурой ПП—зазор—диэлектрическая плёнка—электрод, работоспособного при ускорениях 10^5 – 10^6g .

Моделирование электретного МЭМС-акселерометра для сверхвысоких ускорений. Электромеханическая схема рассматриваемого акселерометра приведена на рис. 1. Механическую часть прибора можно представить как систему масса—пружина. Электрический сигнал возникает в моменты изменения расстояния между пластинами конденсатора $x(t)$, одна из которых размещена на корпусе прибора, а другая совмещена с массой m , закреплённой на пружине. Такое устройство описывается системой уравнений

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx - F_e = -ma, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} [C(t)(V(t) + V_P)] = -\frac{V(t)}{RS}, \quad (2)$$

где F_e — сила притяжения пластин электрическим полем; a — внешнее ускорение; k — коэффициент жёсткости пружины; c — коэффициент механического сопротивления (вязкость среды); $C(t)$ — удельная ёмкость структуры металл—электрет—зазор—подвижный электрод; $V(t)$ — напряжение на структуре (или на нагрузке R); S — площадь ПП.

Сила притяжения пластин акселерометра

$$F_e(t) = \frac{Q_s^2 S}{2\epsilon_0}, \quad (3)$$

плотность заряда, индуцированного при движении ПП на подвижном электроде,

$$Q_S(t) = -C(t)(V(t) + V_P), \quad (4)$$

характеристический потенциал плёнки электрета

$$V_P = Q_P / C_F, \quad (5)$$

где Q_P — плотность поверхностного заряда электрета; $C_F = \epsilon\epsilon_0/d$ — удельная ёмкость слоя диэлектрика (электрета), $\epsilon\epsilon_0$ — его диэлектрическая проницаемость, d — толщина слоя.

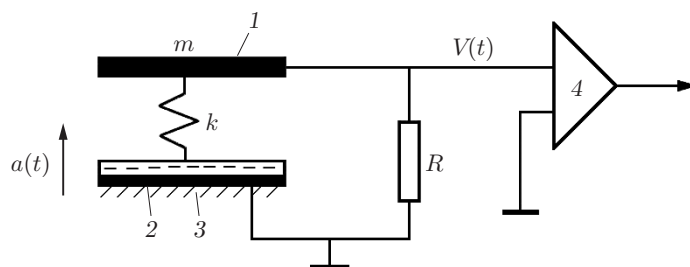


Рис. 1. Электромеханическая схема электретного акселерометра (1 — подвижный электрод с массой m , 2 — неподвижный электрод с нанесённым на него электретом, 3 — корпус, 4 — согласующий усилитель)

Очевидно, что для всех типов акселерометров необходимо выполнение условий линейности характеристик от амплитуды внешнего воздействия a_0 при гармоническом возбуждении в широком частотном диапазоне:

$$a(t) = a_0 \sin \omega t \quad (6)$$

(здесь $\omega = 2\pi f$ — угловая частота). Эти требования выполняются при малой глубине модуляции ёмкости, когда $(C_{\max} - C_{\min})/C_{10} \ll 1$ (где $C_{10} = \varepsilon_0/(d/\varepsilon + d_0)$ — среднее значение удельной ёмкости за период колебаний, C_{\max} и C_{\min} — максимальное и минимальное значения удельной ёмкости, d_0 — величина начального зазора) и соответственно $V(t) \ll V_P$.

Можно отметить, что возникновение высоких перегрузок (ускорений) происходит в момент соударения поверхностей, когда имеет место последующее движение тела в упругой среде с механическими напряжениями в ней, сопровождаемыми достаточно высокочастотными колебаниями, определяемыми геометрическими размерами соударяющихся тел и соотношением их масс. В данной задаче амплитуда колебаний, возбуждённых ударом, задаётся величиной $a(t)$.

При больших амплитудах ускорений a_0 величиной электрической силы в указанных условиях можно пренебречь и полагать $F_e \ll ma$. В этом случае система уравнений (1), (2) распадается на два независимых уравнения:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = -ma, \quad (1a)$$

$$V_P \frac{dC(t)}{dt} + C(t) \frac{dV}{dt} = -\frac{V(t)}{RS}. \quad (2a)$$

Решение уравнения (1a) при гармоническом возбуждении (6) — стандартное, описанное в теории колебаний, например [18]. Для установившегося режима имеем

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где

$$x_m = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}. \quad (9)$$

Здесь $\delta = c/2m$ — коэффициент затухания.

Далее, зная $x(t)$, вычисляем

$$C(t) = \frac{C_F C_1(t)}{C_F + C_1(t)}, \quad (10)$$

$$C_1(t) = \frac{\varepsilon_0}{d_0 - x(t)}, \quad (11)$$

где d_0 — начальная величина зазора между поверхностями диэлектрика и подвижного электрода.

Пренебрегая правым членом уравнения (2а), что справедливо при больших значениях сопротивления нагрузки R , характерных для рассматриваемых схем акселерометров, получаем

$$V(t) = V_P \frac{x(t)}{d_0^*} = V_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (12)$$

$$V_m = V_P(x_m/d_0^*), \quad (13)$$

$$d_0^* = d_0 + d/\varepsilon, \quad (14)$$

где V_m — амплитудное значение напряжения на сопротивлении нагрузки; x_m — амплитуда колебаний, вычисляемая по формуле (8).

В области линейности частотной характеристики при $\omega \ll \omega_0$ имеем

$$x_m = x_0 = a_0/\omega_0^2, \quad (15)$$

$$V(t) = V_0 \cos \omega t, \quad (16)$$

где

$$V_0/V_P = a_0/(\omega_0^2 d_0^*). \quad (17)$$

Таким образом,

$$V_m = (V_0 x_m)/x_0. \quad (18)$$

Общий анализ показывает, что при больших потерях в колебательном контуре, когда его добротность $Q = m\omega_0/c \leq 1$ ($\omega_0 = \sqrt{k/m} = 2\pi f_0$ — угловая частота собственных колебаний, f_0 — резонансная частота), амплитудно-частотная характеристика электретного МЭМС-акселерометра в области низких частот имеет практически плоский участок со слабо выраженным максимумом вблизи области резонансной частоты.

Резкое падение сигнала наблюдается в области частот, превышающих резонансную частоту (рис. 2). Для подавления амплитуды максимума (и сохранения протяжённости

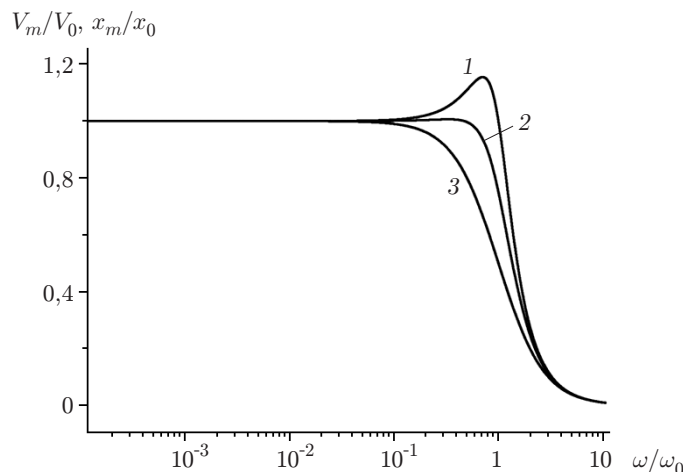


Рис. 2. Частотная характеристика электретного акселерометра сверхвысоких ускорений. Параметры: $m = 4,8 \cdot 10^{-11}$ кг, $k = 10^4$ Н/м, $a_0 = 10^6$ м/с², $V_P = 226$ В, $d_0 = 10^{-6}$ м, $\varepsilon = 10$, $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м, $S = 10^{-8}$ м² ($d_0^* = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м, $f_0 = 2,3 \cdot 10^6$ Гц), $Q = 1$ (кривая 1), 0,75 (2), 0,5 (3)

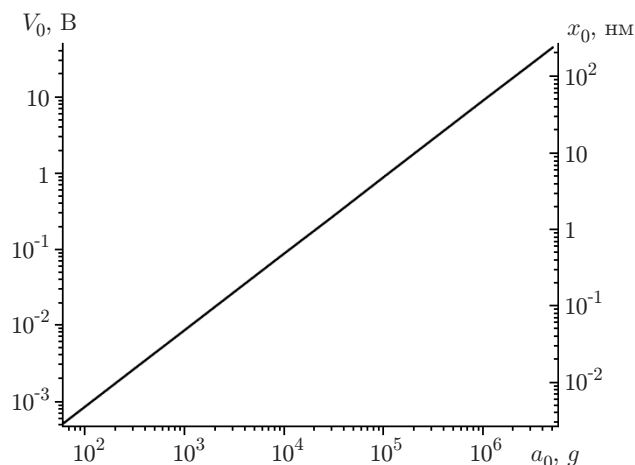


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного сигнала акселерометра и смещения ПП относительно корпуса от амплитуды ускорения $f = 10^5$ Гц при указанных на рис. 2 параметрах

плоского участка АЧХ, максимально возможного) необходимо использовать конструкцию акселерометра с высокими потерями, т. е. с низкой добротностью $Q \leq 1$ (ср. кривые 1–3).

При $V \ll V_P$ или при $a_0 \ll \omega_0^2 d_0^*$ (когда $V < 0,2V_P$) амплитуда выходного сигнала акселерометра зависит линейно от амплитуды ускорения и электростатического потенциала и обратно пропорциональна величинам k и d_0 (рис. 3, выражение (17)).

Полагая $d_0^* \sim 10^{-6}$ м, при величине ускорения порядка $10^6 g$ имеем $f_0 \geq 1,25 \cdot 10^6$ Гц. Таким образом, для обеспечения эффективной работы рассматриваемого электростатического МЭМС-акселерометра при малой массе подвижного элемента должна быть использована достаточно жёсткая пружина.

В общем случае начальное положение ПП не совпадает с высотой её подвеса d_0 , оно сдвигается на величину x_{in} в сторону неподвижного электрода за счёт действия сил электрического поля до положения равновесия, когда сила натяжения пружины kx становится равной силе притяжения поля (3). Тогда

$$\frac{x_{in}}{d_0} = \frac{(C_{10}V_P)^2}{C_0k} \frac{S}{2d_0^2}, \quad (19)$$

где $C_0 = \varepsilon_0/d_0$. Для работы акселерометра в области линейности АЧХ необходимы условия $x_{in}/d_0 \ll 1$ и $x_0/d_0 \ll 1$. Последнее условие соблюдается, когда $a_0 \ll \omega_0^2 d_0$ (15), при этом, как показано выше, выполняется условие малой величины сигнала $V \ll V_P$. Первое условие малого смещения ПП представлено графически на рис. 4, из которого следует, что допустимые значения величины d_0 находятся в узких пределах. Верхнее значение ограничено как требованиями достаточно большой величины сигнала (17), так и соображениями технологии МЭМС: нежелательно его создание значительно больше 1 мкм. Нижнее значение определяется требованиями линейности АЧХ и, как видно из рисунка, оно не может быть меньше 0,4–0,7 мкм в зависимости от величины V_P .

Отметим, что требование линейности АЧХ накладывает ограничение на величину сопротивления нагрузки R . Учитывая (12) и полагая в соответствии с (2а), что $V(t)/RS \ll \ll V_P(dC(t)/dt)$, при $\omega < \omega_0$ получаем

$$RC_{10}S \gg 1/\omega_0. \quad (20)$$

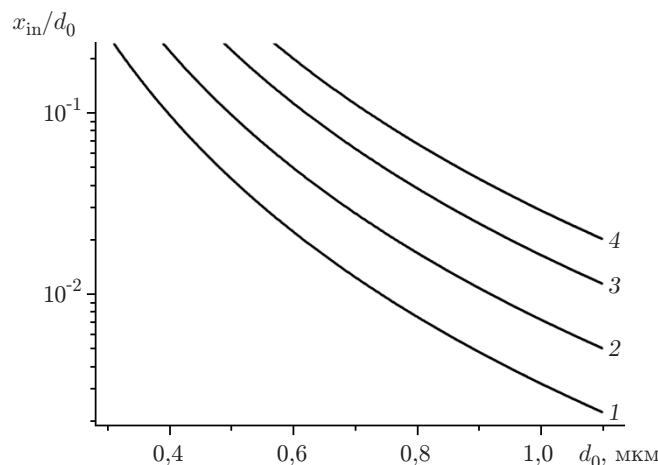


Рис. 4. Зависимость начального смещения ПП от величины зазора d_0 для различных значений V_P . Параметры устройства идентичны указанным в подписи к рис. 2: кривая 1 — $V_P = 100$, 2 — 150, 3 — 226, 4 — 300 В

Чтобы выходной сигнал акселерометра не искажался, должны соблюдаться условия, при которых конденсатор акселерометра не теряет накопленный заряд за время измерений:

$$RC_{10}S \gg 1/\omega. \quad (20a)$$

Это условие создаёт жёсткие ограничения на входное сопротивление усилителя и соответственно временной диапазон измерений. Поэтому для обработки сигнала акселерометра во многих случаях будет удобнее использовать усилитель заряда, который измеряет интеграл от тока, прошедшего в цепи заряда конденсатора, и широко применяется в пьезоэлектрических акселерометрах, что отмечалось и в [19], посвящённой разработке электретного низкочастотного акселерометра для измерения малых ускорений. В данном случае входное сопротивление усилителя мало (в идеализированном случае равно нулю), а его сигнал пропорционален изменению плотности индуцированного заряда:

$$\Delta Q_S(t) = C_{10}V(t). \quad (21)$$

При изменении величины $a(t)$, воздействующей на ПП в области её допустимых смещений, для которой характерна линейность $V_m(a_0)$, и частот, при которых амплитуда смещения не меняется и равна x_0 , имеем

$$V(t) = V_P \frac{a(t)}{\omega_0^2 d_0^*}. \quad (22)$$

На рис. 5 показан пример сигнала акселерометра с вышеуказанными параметрами при его применении для измерения ускорения (торможения) пули (ударника), проникающей в твёрдое тело (пластина алюминия Д16) с начальной скоростью 300 м/с. Для вычисления скорости пули использовались данные, представленные в [20]. Как видно, длительность всего процесса составляет 300 мкс, максимальная величина $a(t)$ доходит до значения близкого к $10^6 g$, она не совпадает с начальным моментом взаимодействия тел, а сдвинута на 20 мкс, это определяется конусообразной формой наконечника пули, когда максимальная интенсивность контакта поверхностей достигается через указанные 20 мкс. Колебания величины $a(t)$, их частота, вероятно, определяются воздействием стоячих упругих звуковых волн в пластине, возникающих при ударе, сопровождаемом сжатием упругого твёрдого тела с увеличением его плотности [21, 22].

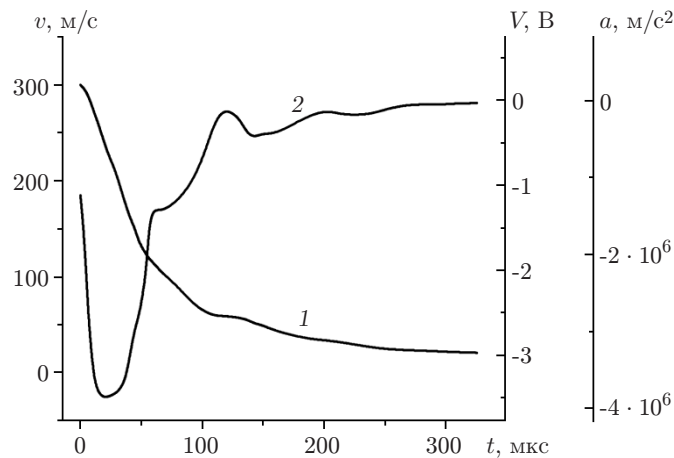


Рис. 5. Изменение скорости ударника при проникновении через пластину алюминия Д16 толщиной 4 мм (кривая 1) [20, рис. 28]; сигнал $V(t)$ микроакселерометра с параметрами, указанными в подписи к рис. 2, и измеряемое ускорение (кривая 2) (для формы ударника 5 [20, табл. 6])

Заключение. Проведённый анализ позволяет представить в первом приближении основные особенности функционирования рассматриваемой МЭМС-структуры и может быть использован при проектировании и изготовлении МЭМС-акселерометров сверхвысоких ускорений. Очевидно, что для точного модельного описания работы конкретного устройства необходимо учитывать также и детали конкретной конструкции акселерометра. Однако и без учёта этих деталей можно указать на возможность создания описанного прибора в МЭМС-исполнении. В частности, параметры акселерометра, близкие к вышеприведённым (см. рис. 2 и 3), достигаются при применении в качестве ПП пластины кремния (толщиной 2–3 мкм и площадью $0,5\text{--}2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$), закреплённой на пружине с жёсткостью $k = 10^4 \text{ Н/м}$. Такая конструкция способна выдерживать высокие перегрузки. Для увеличения жёсткости можно использовать ПП с меньшей площадью и большей толщиной, соединив для повышения выходного тока несколько элементов параллельно. Конкретный способ изготовления пружины подвески выходит за рамки данной работы, однако априори полагаем, что для этой цели подходят балки либо пластины, характеристики которых достаточно хорошо описаны, например, в [23–25].

В [26–28] показано, что электреты на основе плёнок SiO_2 и структур $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$ обеспечивают при толщине диэлектрика 1–2 мкм заряд, достаточный для создания высокого электретного потенциала (до значений 200–300 В) при времени сохранения заряда до 10 лет. Такие параметры характерны для указанных плёнок, синтезированных на поверхности кремния, и при формировании заряда в процессе коронного разряда. Время сохранения заряда может быть увеличено термическими отжигами или путём химической стабилизации поверхности плёнки диэлектрика. Проведённые нами экспериментальные исследования структур SiO_2 толщиной 0,8 мкм и Si_3N_4 толщиной 0,2 мкм по формированию при температуре 200 °С в процессе коронного разряда значения $V_P = 230 \text{ В}$ подтверждают литературные данные. Отметим, что возможно и использование поверхностного потенциала, формируемого за счёт поляризации в плёнках сегнетоэлектриков [29], поскольку они также допускают высокую напряжённость поля в зазоре без его пробоя. Однако в отличие от микрогенераторов, работающих в области нанометровых зазоров [30–32], в такой структуре значительный выигрыш относительно амплитуды выходного сигнала не будет достигнут.

Отличия рассмотренного МЭМС-акселерометра сверхвысоких ускорений от акселерометров, основанных на пьезорезистивном эффекте, следующие:

- не требует использования источников напряжения;
- обеспечивает более высокую амплитуду выходного сигнала (до нескольких десятков вольт) — до 20 % от величины V_p , превышающую на 1–2 порядка максимальный сигнал от пьезорезисторов, что определяется возможностью получения больших значений электростатического потенциала (до нескольких сотен вольт);
- обработка сигнала более простая, сигнал пропорционален величине ускорения, при этом не требуется создания мостиковой схемы датчиков;
- не нужны специальные схемы термостабилизации и процессорной обработки;
- геометрические размеры активного элемента (ПП) много меньше размеров тензорезистивных акселерометров, в то же время можно отметить, что большая масса, используемая в тензоакселерометрах, препятствует увеличению диапазона измеряемых ими ускорений, которые составляют 10^4 – $10^5 g$.

Рассматриваемый акселерометр работоспособен при ускорениях до $10^6 g$ и более в диапазоне частот до 10^6 Гц, когда деформация подвижной пластины значительно меньше предела её прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tian B., Liu H., Yang N. et al.** Design of a piezoelectric accelerometer with high sensitivity and low transverse effect // *Sensors*. 2016. **16**, Is. 10. P. 1587–1593.
2. **Hindrichsen C. C., Lau-Moeller R., Bove T., Thomsen E. V.** MEMS accelerometer with screen printed piezoelectric thick film // *Proc. IEEE Sensors*. IEEE, 2006. P. 1477–1480.
3. **Wagner J., Burgemeister J.** Piezoelectric accelerometers. Theory and application. Radebeul, Germany: Manfred Weber Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., 2012. 47 p.
4. **Je Ch. H., Lee M., Jung S. et al.** Sensing gap reconfigurable capacitive type MEMS accelerometer // *Proc. SPIE*. 2008. **6800**. 68001Z.
5. **Renard S.** Industrial MEMS on SOI // *Journ. Micromech. Microeng.* 2000. **10**, N 2. P. 245–249.
6. **Narasimhan V., Li H., Tan Ch. S.** Monolithic CMOS-MEMS integration for high-g accelerometers // *Proc. SPIE*. 2014. **9254**. 925410.
7. **Zhang Z., Shi Z., Yang Z. et al.** Design, simulation and fabrication of triaxial MEMS high shock accelerometer // *Journ. Nanosci. Nanotechnol.* 2015. **15**, N 4. P. 2952–2957.
8. **Zhao Y., Li X., Liang J., Jiang Z.** Design, fabrication and experiment of a MEMS piezoresistive high-g accelerometer // *Journ. Mech. Sci. Technol.* 2013. **27**, N 3. P. 831–836.
9. **Fan K., Che L., Xiong B., Wang Yu.** A silicon micromachined high-shock accelerometer with a bonded hinge structure // *Journ. Micromech. Microeng.* 2007. **17**, N 6. P. 1206–1210.
10. **Dong J., Li X., Wang Yu. et al.** Silicon micromachined high-shock accelerometers with a curved-surface application structure for over-range stop protection and free-mode-resonance depression // *Journ. Micromech. Microeng.* 2002. **12**, N 6. P. 742–746.
11. **Wung A., Park R. V., Rebello K. J., Fedder G. K.** Tri-axial high-g CMOS-MEMS capacitive accelerometer array // *Proc. of the IEEE 21st Intern. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems* 2008. IEEE, 2008. P. 876–879.
12. **Krishnan G., Kshirsagar Ch. U., Ananthasuresh G. K., Bhat N.** Micromachined high-resolution accelerometers // *Journ. Indian Inst. Sci.* 2007. **87**, N 3. P. 333–361.
13. **Hillenbrand J., Motz T., Sessler G. M.** High sensitivity electret accelerometer with integrated FET // *IEEE Sensors Journ.* 2014. **14**, N 6. P. 1770–1777.

14. Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Буханец Д. И. Оценка максимальной удельной мощности ёмкостных электростатических микрогенераторов // Нано- и микросист. техн. 2016. 18, № 8. С. 518–528.
15. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.: ГИФМЛ, 1959. 916 с.
16. Hillenbrand J., Kodejska M., Garcin Y. et al. High-sensitivity piezoelectret-film accelerometers // IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation. 2010. 17, N 4. P. 1021–1027.
17. Hillenbrand J., Haberzettl S., Motz T., Sessler G. M. Electret transducers for measuring acceleration and structure-borne sound // Proc. of the 24th Intern. Conf. on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2010) Including the 3rd Intern. Conf. on Uncertainty in Structural Dynamics (USD 2010). Leuven, Belgium, 2010 P. 571–579.
18. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний Л.: Наука, 1989. 252 с.
19. Hillenbrand J., Haberzettl S., Motz T., Sessler G. M. Electret accelerometers: Physics and dynamic characterization // Journ. Acoust. Soc. Amer. 2011. 129, N 6. P. 3682–3689.
20. Орлов Ю. Н. Исследование процессов высокоскоростного деформирования и разрушения комбинированных ударников: Автореф. ... дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2007. 34 с.
21. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1968. 592 с.
22. Горелик Г. С. Колебания и волны. М.: Физматлит, 1959. 572 с.
23. Вайндберг Д. В., Вайндберг Е. Д. Расчет пластин. Киев: Будівельник, 1970. 437 с.
24. Гридчин В. А., Драгунов В. П. Физика микросистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. Ч. 1. 415 с.
25. Прочность, устойчивость, колебания /Под ред. И. А. Биргора, Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. Т. 3. 567 с.
26. Olthuis W., Bergveld P. On the charge storage and decay mechanism in silicon dioxide electrets // IEEE Trans. Electrical Insulation. 1992. 27, N 4. P. 691–697.
27. Minami T., Utsubo T., Yamatani T. et al. SiO₂ electret thin films prepared by various deposition methods // Thin Solid Films. 2003. 426, Is. 1–2. P. 47–52.
28. Козодаев Д. А. Электретный эффект в структурах Si—SiO₂ и Si—SiO₂—Si₃N₄: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. С.-Пб.: Изд-во СПГЭУ «ЛЭТИ», 2002. 16 с.
29. Asanuma H., Oguchi H., Hara M., Kuwano H. Ferroelectric dipole electrets prepared from soft and hard PZT ceramics in electrostatic vibration energy harvesters // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2013. 476, Conf. 1. 012041.
30. Багинский И. Л., Камышлов В. Ф., Косцов Э. Г. Исследование особенностей функционирования двухконденсаторного электростатического генератора // Автометрия. 2011. 47, № 6. С. 100–120.
31. Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Электростатические микрогенераторы энергии с высокой удельной мощностью // Автометрия. 2010. 46, № 6. С. 90–105.
32. Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Новый подход к созданию электростатических микрогенераторов ударного типа // Автометрия. 2015. 51, № 3. С. 113–125.

Поступила в редакцию 9 марта 2017 г.