

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ГИБКИМИ АВТОЭЛЕКТРОННЫМИ ЭМИТТЕРАМИ

*В. И. Клещ<sup>\*</sup>, А. Н. Образцов*

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет  
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 18 января 2024 г.,  
после переработки 18 января 2024 г.  
Принята к публикации 6 февраля 2024 г.

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования эффекта возникновения электромеханических автоколебаний в системах, представляющих собой вакуумный диод с гибким автоэмиссионным катодом, в зависимости от его упругих свойств и способности к деформации. Экспериментально продемонстрирована возможность реализации автоколебательного режима для автоэлектронных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок и алмазных микроигл. Разработана математическая модель электромеханических процессов, происходящих в рассматриваемых автоколебательных системах. На основе анализа совокупности полученных экспериментальных данных и моделирования показано, что эффект возбуждения автоколебаний в системе с гибким автоэмиссионным катодом определяется сочетанием параметров системы, обеспечивающих отрицательное значение эффективного коэффициента затухания. Рассмотрены потенциальные возможности практического использования автоколебаний автоэмиссионных катодов в различных микро- и нанoeлектромеханических системах.

DOI: 10.31857/S0044451024060038

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия было получено достаточно большое число экспериментальных свидетельств явления, заключающегося в возникновении устойчивых незатухающих механических колебаний автоэмиссионных катодов, обладающих определенной механической гибкостью и упругостью, в процессе эмиссии электронов при постоянном приложенном напряжении [1–9]. Данное явление первоначально наблюдалось при изучении автоэлектронной эмиссии из отдельных углеродных нанотрубок (УНТ) и их пучков в камере электронного микроскопа (см., например, [1, 2]). Однако в этих первых исследованиях механизм возникновения таких колебаний не был установлен. Позднее механические колебания, возникающие в процессе эмиссии электронов, были подробно исследованы для нанопроволок из карбида кремния [3, 4], отдельных многостенных УНТ [5], микроразмерных жгутов, сплетенных из УНТ [6], а также автоэмиссионных ка-

тодов макроскопических размеров, изготовленных из тонких УНТ-мембран [7, 8]. В этих работах было показано, что данное явление представляет собой электромеханические автоколебания, возникающие вследствие того, что электрическое поле, вызывающее возникновение автоэмиссионного тока, приводит также к механической деформации упругого эмиттера.

В последнее время было продемонстрировано, что при определенных условиях автоколебания могут наблюдаться не только для достаточно гибких катодов на основе УНТ или нанопроволок, но и для алмазных микроразмерных эмиттеров, обладающих высоким значением модуля упругости и достаточно высокой жесткостью [9]. Также были получены свидетельства того, что эффект автоколебаний может являться одной из причин деградации свойств автокатодов на основе УНТ [10, 11]. Было показано, что при автоэлектронной эмиссии из массива ориентированных УНТ, выращенных на плоской подложке, могут возникать автоколебания отдельных нанотрубок, амплитуда которых может становиться достаточно высокой и приводить к частичному или полному разрушению нанотрубки.

\* E-mail: klesch@polly.phys.msu.ru

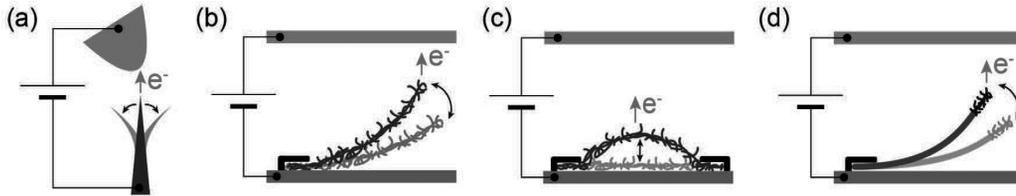


Рис. 1. Схемы экспериментов, в которых наблюдались электромеханические автоколебания автоэлектронных эмиттеров различного типа. *a* — Отдельный наноразмерный эмиттер. *b* — Эмиттер в виде УНТ-полоски, закрепленной за один конец. *c* — Эмиттер в виде УНТ-жгута, закрепленного за оба окончания. *d* — Эмиттер на основе металлической упругой проволоки с УНТ на окончании

В настоящей работе на основе характерных экспериментальных зависимостей проводится анализ общих свойств таких систем и закономерностей, определяющих процесс возбуждения в них автоколебаний, а также обсуждаются перспективы практического применения данного эффекта.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Экспериментальные образцы автоколебательных систем

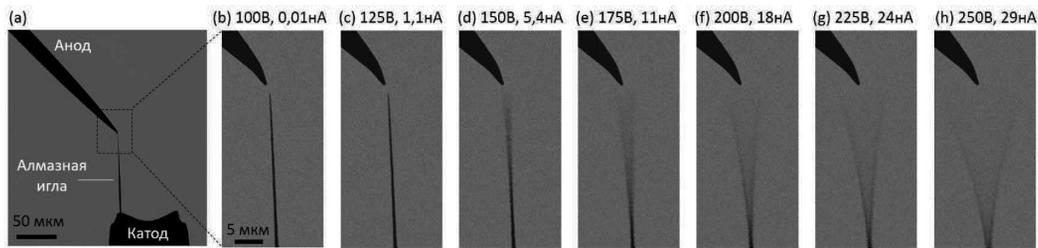
Как было указано во Введении, электромеханические автоколебания наблюдались экспериментально для автоэлектронных эмиттеров различного типа. Более того, геометрия эксперимента и условия измерений также могли существенно отличаться. На рис. 1 представлены схемы автоколебательных систем, которые были исследованы в работах [3–9]. В наиболее общем виде такие системы представляют собой вакуумный диод, на катоде которого закрепляется автоэлектронный эмиттер, обладающий определенной гибкостью и упругостью. В эксперименте между катодом и анодом диода прикладывается постоянное напряжение, достаточное для наблюдения автоэлектронной эмиссии.

На рис. 1 *a* представлена схема измерений, использованная при изучении наноразмерных эмиттеров, например, в виде отдельной УНТ [5], пучка УНТ [2] или нанопроволоки из карбида кремния [3]. В этом случае использовался анод в виде металлического острья, который располагался в непосредственной близости от вершины эмиттера, на расстоянии, не превышающем несколько микрометров.

В случае эмиттеров макроскопических размеров, например, в виде узких полосок, изготовленных из тонких мембран, или жгутов, скрученных из большого числа УНТ, автоколебания исследовались в схеме плоского вакуумного диода, как показано на рис. 1 *b, c*. Причем автоколебания наблюда-

лись при точечном креплении таких гибких эмиттеров на плоском основании как за одно окончание [7] (рис. 1 *b*), так и за оба [6] (рис. 1 *c*). Автоколебательный режим был также реализован для эмиттера в виде отрезка металлической проволоки с закрепленным на его окончании фрагментом УНТ-мембраны [8] (рис. 1 *d*). Параметры колебаний и условия их возбуждения определялись в данном случае комбинацией упругих свойств проволоки и автоэмиссионных характеристик УНТ.

В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментов, проведенных для эмиттеров, изготовленных из материалов двух типов, механические свойства которых значительно различались. Одна из исследованных разновидностей эмиттеров представляла собой иглоподобный кристаллит алмаза (микроиглу) с монокристаллической структурой длиной 100 мкм, толщиной вблизи основания около 1 мкм и радиусом окончания около 10 нм (рис. 2 *a*). Подробное описание методики изготовления алмазных микроигл и их структурных свойств представлено в работах [12, 13]. Значение модуля упругости таких микроигл соответствует значению, характерному для объемного монокристаллического алмаза, а типичное значение добротности колебаний микроиглы, закрепленной за основание, составляет порядка 1000 [9]. Второй тип эмиттеров, исследуемых в данной работе, представлял собой полоску длиной 5 мм и шириной 0.5 мм, вырезанной из тонкой мембраны, которая на 99 % состояла из переплетенных между собой одностенных УНТ (ОУНТ) и имела толщину порядка 0.1 мкм (рис. 3 *a*). Методика изготовления и структура таких ОУНТ-мембран подробно описаны в работах [7, 14]. Эмиттеры в виде ОУНТ-полосок обладали гораздо более низким значением модуля упругости по сравнению с алмазными микроиглами, а значение добротности колебательной системы из таких полосок, закрепленных за одно из окончаний, типично не превышало 10.



**Рис. 2.** *a* — РЭМ-изображение расположения элементов при автоэмиссионном эксперименте с алмазной микроиглой. *b–h* — РЭМ-изображения окончания алмазной микроиглы (катода) и вольфрамового анода при различных значениях приложенного напряжения и автоэмиссионного тока

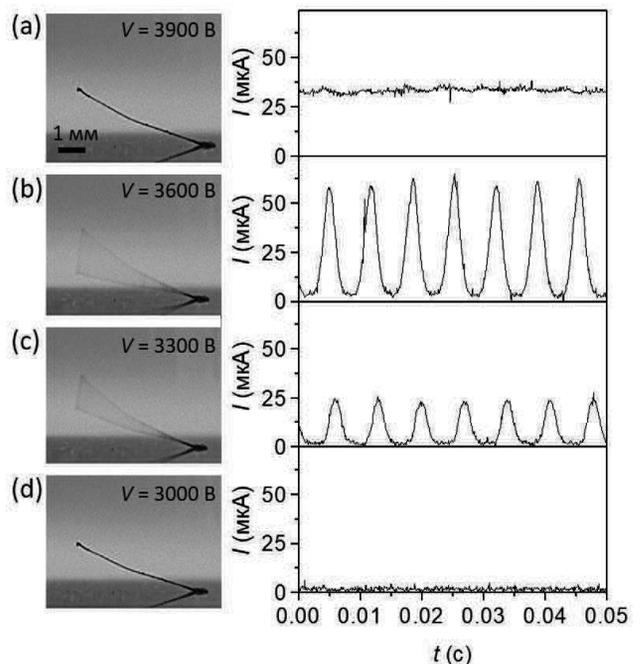
### 2.2. Эмиттеры на основе алмаза

Результаты экспериментов с алмазной микроиглой представлены на рис. 2. В этом случае эксперимент проводился по схеме, показанной на рис. 1 *a*, внутри камеры растрового электронного микроскопа (РЭМ, модель FEI Versa 3D) при уровне вакуума порядка  $10^{-6}$  Торр. В качестве анода использовалась заостренная вольфрамовая проволока, окончание которой располагалось на расстоянии нескольких микрометров от вершины алмазной микроиглы.

При приложении к диоду постоянного напряжения из окончания алмазной микроиглы наблюдалась автоэлектронная эмиссия, значение тока которой измерялось с помощью пикоамперметра (модель Keithley 6487). При превышении определенного порогового значения напряжения наблюдались стабильные незатухающие механические колебания окончания иглы с частотой около 1.4 МГц, близкой к собственной частоте микроиглы. Амплитуда колебаний увеличивалась с увеличением напряжения, которое приводило также к возрастанию автоэмиссионного тока, как показано на рис. 2 *b–h*. Пороговое напряжение возникновения автоколебаний в представленном случае составляло 150 В. При напряжении 250 В максимальное отклонение окончания иглы от ее оси составляло около  $20^\circ$ , что близко к предельной деформации, при которой высока вероятность отламывания иглы в месте наибольшего механического напряжения. Важно отметить, что значения измеряемого автоэмиссионного тока не изменялись при выключении электронного пучка микроскопа. Это означает, что колебания не связаны с действием электронного пучка, как, например, наблюдалось в работе [15]. Поэтому в рассматриваемой системе имеют место именно автоколебания, поддерживаемые за счет приложенного постоянного напряжения.

### 2.3. Эмиттеры на основе ОУНТ

Результаты измерений с эмиттером в виде тонкой ОУНТ-полоски представлены на рис. 3. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 1 *b*. ОУНТ-полоска закреплялась на плоском металлическом основании за один из концов с помощью проводящего графитового скотча. Основание с полоской мембраны закреплялось на держателе катода в измерительной вакуумной ячейке параллельно плоскому металлическому аноду на расстоянии



**Рис. 3.** *a–d* — Фотографии эмиттера в виде УНТ-полоски и соответствующие зависимости автоэмиссионного тока от времени при различных значениях приложенного постоянного напряжения. В нижней части фотографий видно отражение полоски УНТ от зеркальной поверхности металлического основания

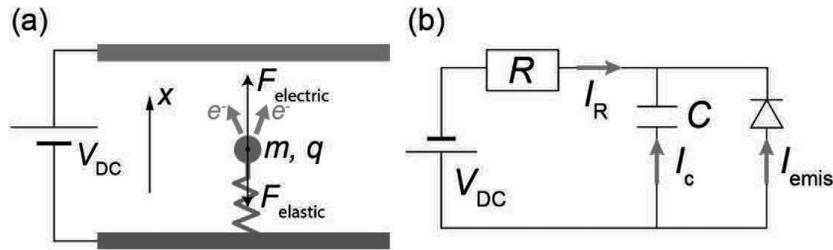


Рис. 4. *a* — Эмпирическое представление системы с гибким автоэлектронным эмиттером. *b* — Эквивалентная электрическая схема системы

10 мм. Исследования проводились при уровне вакуума в ячейке  $10^{-6}$  Торр.

При приложении постоянного напряжения между катодом и анодом незакрепленный конец полоски отклонялся в сторону анода под действием электростатических сил (рис. 3 *d*). С увеличением напряжения изгиб мембраны увеличивался и при напряжении 3000 В возникала автоэлектронная эмиссия из ОУНТ, находящихся на конце полоски. При напряжении 3300 В автоэмиссионный ток достигал величины 25 мкА и конец полоски начинал осциллировать, как показано на рис. 3 *e*. Зависимость автоэмиссионного тока от времени, регистрировавшаяся с помощью осциллографа, имела вид негармонических периодических колебаний (рис. 3 *c, b*). Частота колебаний в данном случае составляла 140 Гц. Амплитуда колебаний увеличивалась с увеличением напряжения, однако при превышении некоторого порогового значения напряжения около 3900 В колебания не наблюдались (рис. 3 *a*). Таким образом, в данном случае автоколебания в системе возникали только в определенном диапазоне напряжений.

### 3. МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Эмпирическая модель, описывающая электромеханические процессы в системе с гибким автоэлектронным эмиттером, была предложена ранее в работах [4, 7]. В настоящей работе данная модель используется для проведения анализа экспериментальных данных и определения необходимых общих условий для реализации автоколебательного режима.

Для описания общих закономерностей в исследуемых автоколебательных системах рассмотрим одномерный случай движения материальной точки под действием электрического поля (рис. 4 *a*). Уравнение движения для материальной точки с эффек-

тивной массой  $m$  и координатой  $x$  можно записать в общем виде

$$m\ddot{x} = F_{electric} + F_{elastic} + F_{friction}.$$

Здесь

$$F_{elastic} = m\omega_0^2 x$$

— сила упругости, определяемая собственной частотой  $f_0 = \omega_0/2\pi$ ;

$$F_{friction} = m(\omega_0/Q)\dot{x}$$

— линейная по скорости сила внутреннего трения, определяемая добротностью  $Q$ ;

$$F_{electric} = dW/dx$$

— электростатическая сила (сила Кулона), которая связана с электростатической энергией  $W = C(x)V^2/2$ , определяемой напряжением на эмиттере  $V$  и его эффективной емкостью  $C(x)$ , зависящей от координаты  $x$ . Напряжение на эмиттере  $V$  связано с напряжением  $V_{DC}$ , которое прикладывается к обкладкам конденсатора, уравнением Кирхгофа

$$I_{emis} + I_C = I_R$$

для эквивалентной электрической схемы системы, представленной на рис. 4 *b*. Здесь  $I_{emis}$  — ток автоэлектронной эмиссии,

$$I_C = \frac{d(C(x)V)}{dt}$$

— емкостный ток,

$$I_R = \frac{V_{DC} - V}{R}$$

— ток через тело эмиттера с сопротивлением  $R$ . Анализ уравнения движения при подстановке в него малых гармонических колебаний координаты

$$x(t) = X_0 + X \cos(\omega_0 t)$$

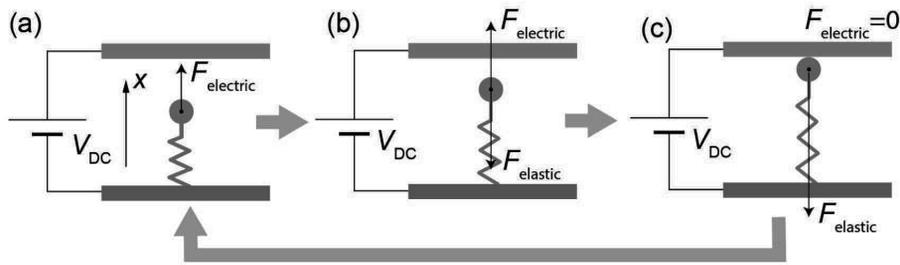


Рис. 5. a–c — Схема движения материальной точки под действием электростатической и упругой сил

и напряжения вблизи положения равновесия

$$V(t) = V_0 + V \cos(\omega_0 t + \phi_0)$$

показывает, что эффективный коэффициент затухания в системе может быть записан в виде

$$\gamma = \gamma_0 - \Delta\gamma(V) = \frac{\omega_0}{Q} - \text{const} \frac{\partial I / \partial x}{1 + (\omega_0 \tau)^{-2}} V. \quad (1)$$

В данной формуле введены следующие обозначения:  $\gamma_0$  — коэффициент затухания собственных механических колебаний,  $\Delta\gamma(V)$  — изменение коэффициента затухания за счет наличия автоэмиссионного тока. Константа

$$\text{const} = C'(m\omega_0^2 C)^{-1},$$

входящая в выражение для  $\Delta\gamma$ , включает параметры, не зависящие от напряжения. Постоянная времени

$$\tau = R_\Sigma C = \left( \frac{\partial I}{\partial V} + \frac{1}{R} \right)^{-1} C$$

определяется как сопротивлением эмиттера  $R$ , так и дифференциальным сопротивлением  $(\partial I / \partial V)^{-1}$ , т. е. крутизной вольт-амперной характеристики автоэлектронной эмиссии.

Из формулы (1) видно, что при определенных значениях параметров системы коэффициент трения  $\gamma$  может принимать отрицательные значения. В этом случае происходит самовозбуждение системы и колебания становятся нарастающими по амплитуде. Благодаря наличию нелинейных членов в исходном уравнении движения, может происходить стабилизация амплитуды колебаний, и в результате будут наблюдаться автоколебания, т. е. стабильные колебания в системе с диссипацией, поддерживаемые за счет внешнего источника энергии (источника постоянного напряжения) [16].

Роль автоэмиссионного тока может быть наглядно продемонстрирована с помощью модельной системы, изображенной на рис. 5, в которой в процессе движения материальной точки под действием электростатической и упругой сил возможен ее непосредственный контакт с анодом. На рис. 5 a–c показаны схемы, соответствующие движению материальной точки в сторону анода. В момент касания электростатическая сила становится равной нулю, так как весь заряд материальной точки практически мгновенно «стекает» на анод. После касания материальная точка будет двигаться в противоположном направлении под действием силы, возникающей из-за упругой деформации, до тех пор, пока ее заряд не восстановится, после чего процесс повторится вновь. Время обратного движения и, соответственно, период колебаний в такой системе будет определяться постоянной времени  $RC$ , т. е. характерным временем зарядки емкости системы.

В системе с автоэмиссионным катодом, когда вместо касания анода при определенном значении напряжения возникает автоэлектронная эмиссия, заряд эмиттера также начинает «стекать» на анод, но не мгновенно, а в соответствии с величиной эмиссионного тока, определяемого вольт-амперной характеристикой  $I(V)$ . Стеkanie заряда за счет автоэмиссионного тока, уменьшая напряжение на эмиттере и, соответственно, величину электростатической силы, как бы «толкает» материальную точку в направлении от анода, за счет чего и реализуется положительная обратная связь в системе. Таким образом, автоэмиссионный ток играет роль нелинейного элемента, который является неотъемлемой частью любой автоколебательной системы [16]. При этом, как будет показано в следующем разделе, определяющую роль для возникновения автоколебаний играет соотношение между постоянной времени  $\tau = R_\Sigma C$  и периодом собственных колебаний гибкого катода  $2\pi\omega_0^{-1}$ .

#### 4. УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Как обсуждалось выше, автоколебания возникают, когда значение эффективного коэффициента затухания становится отрицательным. Полученная формула (1) позволяет сформулировать физические причины появления автоколебаний, т. е. условия, при которых изменение коэффициента затухания  $\Delta\gamma$ , возникающее за счет наличия автоэмиссионного тока, превышает коэффициент затухания механических колебаний эмиттера  $\gamma_0 = \omega_0/Q$ . Типичный вид функции  $\Delta\gamma(V_{DC})$  представлен на рис. 6 для параметров, соответствующих экспериментам с УНТ-полосками.

При значении добротности  $Q = 10$ , полученном в эксперименте, кривая  $\Delta\gamma$  пересекает уровень  $\gamma_0$  в точках  $V_{min}$  и  $V_{max}$ , являющихся границами диапазона, в котором возникают автоколебания. Добротность характеризует внутреннее трение в системе, и при более низких значениях  $Q$  (например, при  $Q = 5$  на рис. 6 а) коэффициент затухания всюду положителен и автоколебаний не возникает. В то же время в случае низкого трения (например, при  $Q = 50$  на рис. 6 а) автоколебания наблюдаются во всем диапазоне напряжений, превышающих пороговое напряжение. Последний случай соответствует эксперименту с алмазной микроиглой, в котором добротность была значительно выше, чем для ОУНТ-полоски, и автоколебания не исчезали с увеличением напряжения вплоть до предельных значений автоэмиссионного тока и амплитуды колебаний.

На рис. 6 б представлена зависимость величины  $\omega_0\tau$  от приложенного напряжения. Видно, что автоколебания возникают при условии  $\omega_0\tau \sim 1$ , т. е. когда характерное время зарядки емкости системы одного порядка с периодом собственных колебаний гибкого автокатода. В области низких напряжений величина  $\tau$  постоянна, так как  $R_{\Sigma} \approx R$ , и принимает максимальное значение  $\tau = RC$ . При увеличении напряжения возникает автоэмиссионный ток и  $\tau$  уменьшается, так как процесс перезарядки емкости системы ускоряется за счет уменьшения величины дифференциального сопротивления  $(\partial I/\partial V)^{-1}$ . В пределе при высоких напряжениях  $R_{\Sigma} = (\partial I/\partial V)^{-1}$ , так что  $R_{\Sigma}$  стремится к нулю. Поэтому условие  $\omega_0\tau \sim 1$  выполняется, когда сопротивление эмиттера  $R$  и дифференциальное сопротивление  $(\partial I/\partial V)^{-1}$  имеют один порядок величины.

Величина  $\Delta\gamma$  в формуле (1) определяется произведением функций  $1/[1 + (\omega_0\tau)^{-2}]$  и  $\partial I/\partial x$ , типичные графики которых представлены на рис. 6 в. Вид-

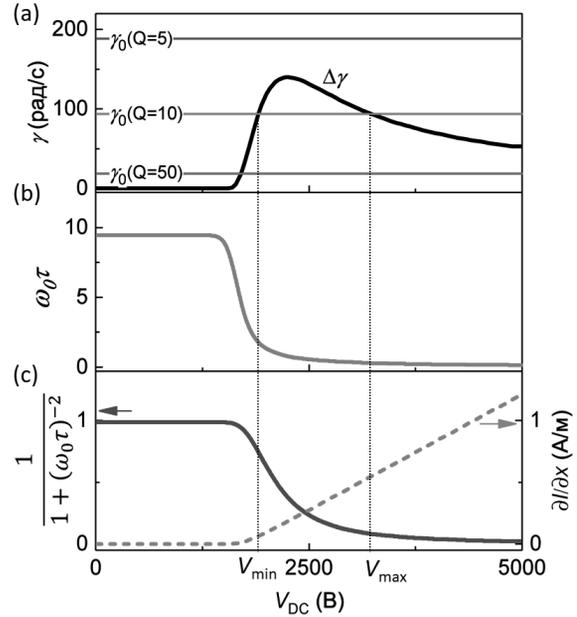


Рис. 6. а-с — Зависимости различных членов, входящих в формулу (1), от приложенного напряжения при значениях параметров модели, соответствующих эксперименту с ОУНТ-полоской

но, что выражение  $1/[1 + (\omega_0\tau)^{-2}]$ , как и  $\omega_0\tau$ , стремится к нулю с увеличением напряжения. Производная тока  $\partial I/\partial x$ , напротив, увеличивается при увеличении напряжения. Поэтому произведение этих двух функций максимально в некотором диапазоне напряжений, в котором оказывается возможным возникновение автоколебаний.

Важно отметить, что большое значение производной  $\partial I/\partial x$ , которое характеризует степень изменения автоэмиссионного тока при отклонении эмиттера от положения равновесия, может обеспечивать возможность наблюдения автоколебаний для образцов, имеющих относительно высокую жесткость, как это имеет место для случая алмазной микроиглы (рис. 2). Действительно, за счет выбранной геометрии анода, выполненного в виде острия, относительно небольшое отклонение алмазной микроиглы от положения равновесия приводит к значительному изменению автоэмиссионного тока, за счет изменения расстояния между его окончанием и анодом. Также большое значение  $\partial I/\partial x$  обеспечивает более высокую эффективность преобразования приложенного постоянного напряжения в переменное, что может быть важным при практическом применении рассматриваемых автоколебательных систем.

Таким образом, анализ формулы (1) показывает, что для достижения отрицательной величины эффективного коэффициента затухания пред-

почтительно выполнение условий  $(\partial I/\partial V)^{-1} \sim R$  и  $\omega_0\tau \sim 1$ , при этом параметры  $\partial I/\partial x$ ,  $Q$ ,  $C'$  должны иметь максимально возможное значение, а значения параметров  $\omega_0$ ,  $m$ ,  $C$  должны быть минимальны. При отрицательном коэффициенте затухания амплитуда колебаний возрастает со временем, так что колебания перестают быть малыми, и дальнейшее поведение системы можно установить, решая исходное нелинейное уравнение движения. Со временем, за счет наличия нелинейных членов, происходит стабилизация амплитуды колебаний. Характеристики установившихся автоколебаний определяются конкретным видом зависимостей параметров системы (емкость, напряженность поля и пр.) от координаты и напряжения. В общем случае частота автоколебаний оказывается несколько выше собственной частоты гибкого автокатода из-за дополнительного механического напряжения, создаваемого в результате его деформации под действием электростатической силы. Амплитуда, как и частота автоколебаний, возрастает с ростом электрического напряжения и в значительной степени определяется зависимостью автоэмиссионного тока от координаты.

Представленная модель достаточно хорошо описывает экспериментально наблюдаемые зависимости как для макроскопических эмиттеров на основе мембран и жгутов из УНТ, так и для микро- и наноразмерных эмиттеров в виде отдельной алмазной иглы, углеродной нанотрубки или полупроводниковой нанопроволоки. Таким образом, явление электромеханических автоколебаний в системах с гибкими автокатадами носит общий характер и может наблюдаться для автокатодов любого типа и размера, при выполнении определенных условий и параметрах системы, обеспечивающих отрицательное значение эффективного коэффициента затухания.

## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Значительный интерес может представлять практическое использование автоколебаний гибких автокатодов в различных микро- и нанoeлектромеханических системах. Такие устройства не будут нуждаться во внешнем источнике переменного тока и могут использоваться аналогично активным элементам микроэлектроники. Прежде всего, такой интерес связан с потенциальной возможностью создания генераторных устройств

непосредственно на микроуровне. Кроме того, примерами электромеханических устройств на основе рассматриваемого эффекта могут быть преобразователи постоянного напряжения в переменное, генераторы тактовых импульсов и т.п. Более того, при использовании наноразмерных эмиттеров частоты электромеханических колебаний могут достигать величины, соответствующей микроволновому диапазону электромагнитного излучения. Действительно, в экспериментах с алмазными микроиглами, характерный поперечный размер которых составляет порядка 1 мкм, частоты колебаний лежали в диапазоне от 100 кГц до нескольких МГц. Частота колебаний в первом приближении обратно пропорциональна характерному размеру системы, поэтому для отдельного эмиттера диаметром 1 нм (например, для отдельной углеродной нанотрубки) частота автоколебаний будет лежать в диапазоне от 100 МГц до нескольких ГГц. Эта оценка совпадает со значениями резонансных частот для отдельных нанотрубок, которые типично регистрируются экспериментально при возбуждении внешним переменным электрическим полем [17]. В случае возбуждения автоколебаний в процессе автоэлектронной эмиссии из отдельной нанотрубки заряд, находящийся на ее окончании, будет генерировать высокочастотное электромагнитное поле в окружающем пространстве. Движение электронов, создающее электромагнитную волну, в данном случае будет обусловлено в основном механическим движением окончания эмиттера, а не электрическим током, как это происходит в стандартной передающей антенне. Таким образом, при использовании автоколебательных электромеханических систем потенциально возможно создание наноразмерных источников электромагнитных волн и передающих антенн на их основе, которые могут быть полностью интегрированы в различные микроэлектронные устройства. Кроме того, наличие таких источников позволяет также интегрировать различные нанoeлектромеханические устройства на основе отдельных углеродных нанотрубок, которые используют в своей работе внешние макроскопические генераторы высокочастотных колебаний. К таким устройствам относятся, к примеру, сверхчувствительные сенсоры массы или силы, создаваемые на основе отдельных осциллирующих углеродных нанотрубок или пленок графена [18, 19], устройства передачи и приема радиосигналов на наноразмере [20, 21], генераторы тактовой частоты [22], электронные логические элементы [23] и другие.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован эффект электромеханических автоколебаний, возникающих в системах с гибкими автоэлектронными эмиттерами. Рассмотрены основные типы систем, для которых наблюдается данный эффект, и представлены результаты экспериментов для двух репрезентативных разновидностей эмиттеров на основе УНТ и алмазных микроигл, механические свойства которых имели значительные различия. С использованием разработанной математической модели рассматриваемых автоколебательных систем определены требования к механическим (добротность, собственная частота) и электронным (емкость, сопротивление, вольт-амперная характеристика) характеристикам системы, необходимым для возникновения в системе отрицательного эффективного коэффициента затухания, при котором реализуется автоколебательный режим. В частности, показано, что постоянная времени, определяющая характерное время перезарядки емкости системы, которая связана с электрическим сопротивлением эмиттера и крутизной вольт-амперной характеристики, должна иметь один порядок величины со значением периода собственных колебаний упругого автоэмиссионного катода. С практической точки зрения эффект автоколебаний может представлять значительный интерес в связи с возможностью создания на его основе микроэлектромеханических генераторных устройств, таких как преобразователи постоянного напряжения в переменное, генераторы тактовых импульсов, передающие антенны и др.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-10067).

## ЛИТЕРАТУРА

- Z. L. Wang, R. P. Gao, W. A. de Heer, and P. Poncharal, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 856 (2002).
- Y. Saito, K. Seko, and J. Kinoshita, *Diam. Relat. Mat.* **14**, 1843 (2005).
- A. Ayari, P. Vincent, S. Perisanu, M. Choueib, V. Gouttenoire, M. Bechelany, D. Cornu, and S. T. Purcell, *Nano Lett.* **7**, 2252 (2007).
- T. Barois, S. Perisanu, P. Vincent, S. T. Purcell, and A. Ayari, *Phys. Rev. B* **88**, 195428 (2013).
- J. A. Weldon, B. Aleman, A. Sussman, W. Gannett, and A. K. Zettl, *Nano Lett.* **10**, 1728 (2010).
- V. I. Kleshch, A. A. Zakhidov, A. N. Obraztsov, E. D. Obraztsova, and R. H. Baughman, *Phys. Stat. Sol. B* **246**, 2658 (2009).
- V. I. Kleshch, A. N. Obraztsov, and E. D. Obraztsova, *JETP Lett.* **90**, 464 (2009).
- V. I. Kleshch, A. N. Obraztsov, and E. D. Obraztsova, *Carbon* **48**, 3895 (2010).
- V. I. Kleshch, R. R. Ismagilov, V. V. Mukhin, A. S. Orekhov, P. Poncharal, S. T. Purcell, and A. N. Obraztsov, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 144101 (2023).
- P. Vincent, F. Panciera, I. Florea, N. Blanchard, C. S. Cojocar, M. Ezzedine, H. Taoum, S. Perisanu, P. De Laharpe, A. Ayari, J. Chaste, K. Saidov, U. Mirsaidov, S. T. Purcell, and P. Legagneux, *Carbon* **213**, 118272 (2023).
- P. Vincent, F. Panciera, I. Florea, M. Ezzedine, M.-R. Zamfir, S. Perisanu, C. S. Cojocar, N. Blanchard, D. Pribat, S. Purcell, and P. Legagneux, *Proc. of 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference* (2021).
- A. N. Obraztsov, P. G. Kopylov, B. A. Loginov, M. A. Dolganov, R. R. Ismagilov, and N. V. Savenko, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 013703 (2010).
- A. N. Obraztsov, P. G. Kopylov, A. L. Chuvilin, and N. V. Savenko, *Diam. Relat. Mat.* **18**, 1289 (2009).
- A. Lobach, N. Spitsina, S. Terekhov, and E. Obraztsova, *Phys. Sol. St.* **44**, 475 (2002).
- P. Vincent, S. Perisanu, A. Ayari, M. Choueib, V. Gouttenoire, M. Bechelany, A. Brioude, D. Cornu, and S. Purcell, *Phys. Rev. B* **76**, 085435 (2007).
- Г. С. Горелик, *Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику*, Физматлит, Москва (2007).
- T. Natsuki, *Electronics* **6**, 56 (2017).
- K. Jensen, K. Kim, and A. Zettl, *Nat. Nanotechnol.* **3**, 533 (2008).
- J.-X. Shi, X.-W. Lei, and T. Natsuki, *Sensors* **21**, 1907 (2021).
- K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, *Nano Lett.* **7**, 3508 (2007).
- P. Vincent, P. Poncharal, T. Barois, S. Perisanu, V. Gouttenoire, H. Frachon, A. Lazarus, E. de Langre, E. Minoux, and M. Charles, *Phys. Rev. B* **83**, 155446 (2011).
- Y. Saito, *Nanostructured Carbon Electron Emitters and Their Applications*, CRC Press (2022).
- Y. V. Pershin and S. Shevchenko, *Nanotechnology* **28**, 075204 (2017).