

Ю. К. Грузевич, В. А. Солдатенков,
В. М. Ачильдиев, Н. А. Бедро,
И. В. Воронин, А. Д. Седова

НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ — НОВЫЙ ПРИЕМНИК ДЛИННОВОЛНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе нанoeлектромеханического преобразователя с автоэлектронной эмиссией разработан принципиально новый приемник оптического излучения, чувствительный в длинноволновой области спектра. Рассмотрены технические аспекты повышения чувствительности таких приемников и приведены особенности нанотехнологии их изготовления.

E-mail: yukg@mail.ru

Ключевые слова: нанoeлектромеханический преобразователь, автоэлектронная эмиссия, приемник оптического излучения, нанотермоэлектромеханический преобразователь.

Решение ряда важных современных научно-технических проблем связано с исследованием пространственного распределения полей электромагнитного излучения: от ближнего инфракрасного (ИК) до радиоволн. Интерес к данному диапазону в значительной степени обусловлен созданием интенсивных когерентных источников — терагерцевых и ИК-лазеров, а также их разнообразным применением. Опыт показал, что дальнейшее освоение длинноволнового (более 20 мкм) оптического спектрального диапазона требует не только совершенствования существующих методов, но и разработки принципиально новых методов регистрации пространственного распределения оптического излучения, квант которого ниже порога фотоэффекта. С этой целью целесообразно рассмотреть возможность теплового взаимодействия исследуемого длинноволнового оптического излучения с регистрирующей средой или структурой. Однако известные приемники, например на соединении Джозефсона (два сверхпроводника, соединенные очень тонким изолирующим оксидным барьером), обладающие высокой чувствительностью при их охлаждении до температур ниже 1 К, не позволяют непосредственно получить пространственное распределение плотности электромагнитного поля. Они могут быть использованы лишь в качестве перемещающегося зонда или в сочетании со сложной сканирующей аппаратурой. В этом случае проведение измерений и обработка их результатов являются

весьма трудоемким процессом, а одновременный обзор поля длинноволнового оптического излучения невыполним. Кроме того, влияние самого зонда на распределение электромагнитного поля существенно ограничивает возможности таких методов регистрации. Поэтому в последние годы значительное внимание уделяется разработке принципиально новых методов регистрации и соответствующих чувствительных структур, основанных на применении нанотехнологий, которые изменяют свои параметры и оптические характеристики при тепловом воздействии исследуемого длинноволнового электромагнитного излучения [1].

Наноэлектромеханические преобразователи с автоэлектронной эмиссией (АЭЭ) для регистрации теплового излучения по сравнению с широко применяемыми в настоящее время микроболометрическими приемниками имеют ряд значительных преимуществ:

- устойчивость (практически не чувствительны) к воздействиям окружающей среды (радиация и излучение всех видов);
- шумовая составляющая в 100 раз меньше шумов микроболометров.

Эти преимущества обусловлены тем, что средой для переноса электронов в автоэлектронных системах является вакуум или инертный газ. В то время как, например, такие широко применяемые материалы для микроболометра, как α -Si при температурах выше 150 и 250 °С становятся проводниками. Вакуумные автоэлектронные чувствительные элементы (ЧЭ) значительно более устойчивы к электромагнитным возмущающим воздействиям вследствие их более высокого уровня рабочих напряжений. Практически их повреждение от излучения частиц невозможно.

Для вакуумных наноэлектромеханических ЧЭ ожидают сверхвысокое быстродействие, поскольку баллистический перенос электронов от катода к аноду допускает в принципе очень короткое время пролета – менее 1пс (10^{-12} с), и быстродействие чувствительной структуры будет определяться только ее жесткостью.

Разработка наноэлектромеханических чувствительных структур для приемников теплового излучения основана на тонкопленочной технологии, что значительно снижает трудозатраты и обеспечивает возможность использования стандартных технологических процессов с доработкой, обусловленной конструкцией ЧЭ.

Принцип действия принципиально нового чувствительного элемента нанотермоэлектромеханического приемника (НТЭМП) основан на преобразовании теплового излучения в механическую деформацию микроразмерной биметаллической пластинки, установленной на миниатюрной опоре. Для преобразования данной деформации в электрический сигнал используется АЭЭ [2].

Основой НТЭМП является ЧЭ, структура которого приведена на рис. 1.

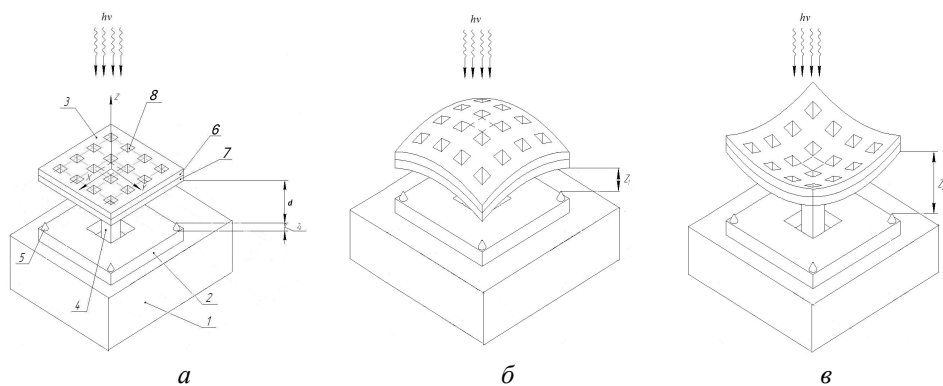


Рис. 1. Чувствительный элемент НТЭМП:

a — $T = T_0$; *б* — $T > T_0$; *в* — $T < T_0$

ЧЭ НТЭМП расположен на подложке 1, выполненной из кремния или сапфира, и состоит из микробиметаллической пластинки 3, преобразующей падающее на нее длинноволновое оптическое ИК-излучение ($h\nu$) в теплоту T . Биметаллический преобразователь содержит два слоя 6 и 7, имеющих технологические отверстия 8 [2]. Слой 6 выполнен из алюминия, а слой 7 из вольфрама. На поверхность пластинки для повышения эффективности регистрации теплового излучения нанесен слой висмута с подслоем из титаната стронция. Биметаллическая пластинка закреплена на подложке с помощью опоры 4 в центре рамочного катода, состоящего из проводящей площадки 2, на верхней поверхности которой расположен вискер 5.

В состав матрицы НТЭМП входят ЧЭ с электронными ключами опроса, строчный и столбцовый мультиплексоры, вакуумированный корпус с возможностью термостабилизации.

Работа данного ЧЭ при регистрации теплового излучения заключается в следующем [2]. На рис. 1, б приведена схема положения чувствительного элемента площадки преобразователя НТЭМП при $T > T_0$, где T_0 — температура пластины до падения на нее оптического излучения. На рис. 1, в показано положение чувствительного элемента площадки преобразователя НТЭМП при $T < T_0$. Изменение зазора приводит к изменению напряженности электрического поля и соответственно к изменению тока АЭЭ.

Тепловое излучение, попадая на чувствительную микробиметаллическую площадку, нагревает ее, последняя под действием тепловой энергии прогибается, изменяя зазор между нижней ее стороной и катодом.

Таким образом, изменение температуры ЧЭ НТЭМП, обусловленное падающим тепловым излучением, приводит к механическому перемещению ЧЭ (см. рис. 1, б, в), причем

$$z_1 = d - z, \text{ при } T > T_0;$$

$$z_2 = d + z, \text{ при } T < T_0,$$

где z — изменение зазора d между биметаллической пластиной и подложкой, обусловленное изменением температуры; z_1, z_2 — зазоры при температуре T_1 и T_2 соответственно.

С точки зрения механики данная задача — задача термоупругости [3]. Параметром нагрузки в этом случае является температура, вызывающая температурные деформации:

$$\varepsilon_t = \alpha T,$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); T — температура.

В связи с необходимостью получения максимальной чувствительности разрабатываемого ЧЭ, используется конструкция многослойной пластинки или многослойной балки. При нагреве многослойной пластинки, состоящей из нескольких материалов с разными ТКЛР, слои подвергаются разным температурным деформациям. Таким образом, задача становится внутренне статически неопределимой, и на основе принципа совместности деформаций можно определить возникающие внутренние силовые факторы (изгибающие моменты). Дополнительный изгиб может возникать за счет наличия градиента температуры при неравномерном нагреве ЧЭ, так как в этом случае каждый элементарный объем пластины будет иметь разные деформации. Для определения оптимальных параметров ЧЭ преобразователя рассмотрим аналитическое решение задачи о температурном нагружении биметаллической пластины с упрощенной геометрией на основе методов строительной механики [4].

Для обеспечения большей чувствительности разность ТКЛР материалов должна быть большой, но в то же время для получения линейной характеристики желательно, чтобы ТКЛР имели одинаковую зависимость от температуры. Материал слоев должен обладать высоким пределом упругости для исключения возникновения остаточных напряжений при работе. При этом требуется высокая пластичность материала, позволяющая изготавливать достаточно тонкие биметаллические слои.

Схема включения ЧЭ НТЭМП приведена на рис. 2. Напряжение питания U ЧЭ подается через нагрузочный резистор на пластину биметаллического преобразователя 1. Катод 2 ЧЭ НТЭМП заземлен.

В этом случае выходное напряжение ЧЭ в первом приближении будет иметь вид

$$U_{\text{ЧЭ}} = U - i_3 R_n,$$

где U — стабилизированное напряжение питания; i_3 — ток эмиссии; R_n — сопротивление нагрузки.

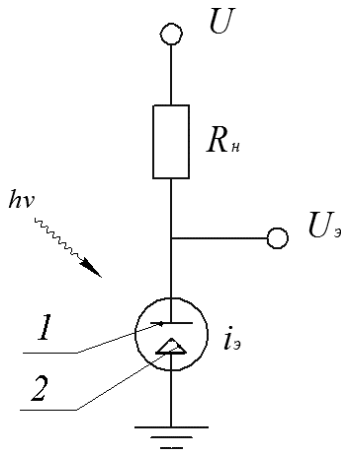


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема включения ЧЭ

При этом ток эмиссии i_3 будет пропорционален температуре T микробиметаллической площадки:

$$I_3 = K_{\text{ЧЭ}} T, \text{ А/К},$$

где $K_{\text{ЧЭ}} = K_T K_3$ — коэффициент преобразования НТЭМП; K_T — коэффициент преобразования температуры в перемещение, м/К; K_3 — коэффициент преобразования перемещения в ток эмиссии, А/м.

Таким образом, измеряя ток эмиссии, получаем информацию о потоке теплового излучения. Предварительные исследования показали, что теоретически при выбранной площади чувствительной площадки плотность тока эмиссии достигает достаточных значений, что позволит существенно уменьшить размеры ЧЭ, увеличив таким образом его температурную чувствительность. Практически размеры ЧЭ НТЭМП определяются технологией его изготовления.

Отличительной особенностью предложенных наноэлектромеханических преобразователей для регистрации длинноволнового оптического излучения является наличие в структуре ЧЭ НТЭМП вискера, являющегося источником электронов и обеспечивающего явление АЭЭ.

При этом зависимость тока эмиссии от напряженности поля в зазоре определяется известным уравнением Фаулера—Нордгейма [5, 6]:

$$i_3 \approx AS \frac{(\beta U_3)^2}{\varphi} \exp\left(-B \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U_3}\right),$$

где A, B — константы; S — площадь вершины вискера; β — форм-фактор или коэффициент, связывающий напряжение U_0 и напряженность E электрического поля у поверхности вискера ($E = \beta U_0$) и зависящий от его геометрических размеров и взаимного расположения электродов; φ — работа выхода электрона из металла.

В конденсаторной структуре форм-фактор плоского катода $\beta = d^{-1}$, в диодной структуре с катодом в виде острия [7]

$$\beta \cong (\rho \ln(d/\rho))^{-1},$$

где ρ — радиус скругления вершины вискера (эмиссионного слоя); d — зазор между вискером и обратной стороной биметаллической пластинки при $T = T_0$.

В проектируемых ЧЭ приемников теплового излучения данный эффект достигается путем придания вискеру конусной формы.

Существуют различные способы формирования вискеров и различные методы инициализации. Наибольшее применение получили методы формирования вискеров методом напыления [7], методом наноструктурированных матриц [8], лазерно-индуцированное формирование [9] и метод локально-зондового окисления [10]. Следует отметить, что практическому использованию этих методов в технологии изготовления НТЭМП препятствует высокая чувствительность вискеров к любым последующим операциям. Исходя из этого, разработан способ локальной инициализации вискера по переменному току после окончательного формирования механической структуры НТЭМП.

Геометрические параметры вискера высота H , диаметр основания D и радиус вершины ρ (рис. 3), а также его коэффициент эмиссии существенно зависят от амплитуды и длительности импульса напряжения, прикладываемого к пластине, температуры и влажности среды инициализации, состава газовой среды, давления, толщины токопроводящего проводника катода и его материала.

Для отработки технологических режимов инициализации АЭЭ разработан и изготовлен стенд. Для изучения условий и режимов формирования вискеров изготовлены кристаллы НТЭМП на основе технологии «металл—сапфир» с токопроводящей поверхностью катода и первого слоя пластины из никеля. Кристаллы НТЭМП установлены в доработанные корпуса QLCC 8/6 (рис. 4) с различной газовой средой, давлением и влажностью.

Инициализация осуществлялась путем подачи импульса напряжения 10...90 В дли-

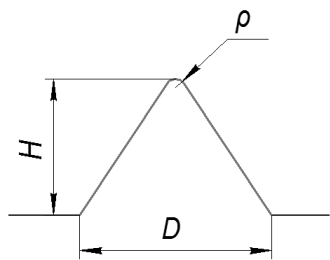


Рис. 3. Геометрия конусообразного вискера

тельностью 1...100 мс. После электрического воздействия записывали вольт-амперные характеристики (ВАХ), а после удаления входного окна и пластины ЧЭ проводились исследования области вискера на лазерном интерферометре MSA 500. На рис. 5, а приведено трехмерное изображение поверхности катода в области вискера; профиль вискера после инициализации АЭЭ методом локального окисления по переменному току представлен на рис. 5, б.

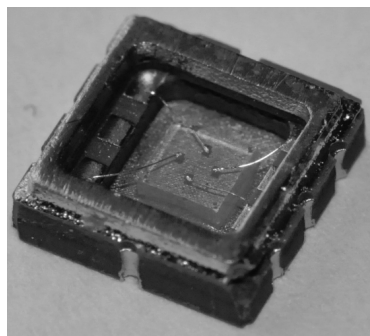
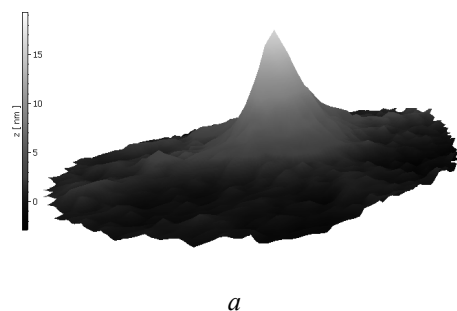
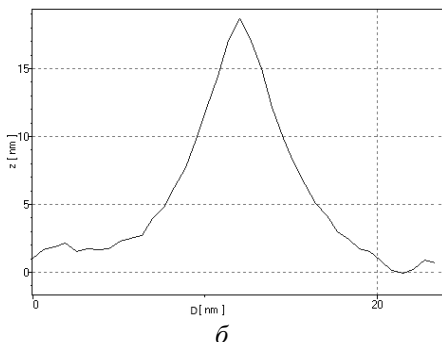


Рис. 4. Кристалл НТЭМП в корпусе QLCC (без входного окна)



а



б

Рис. 5. Фотография (а) и профиль (б) вискера

Габаритные размеры вискера при этом составили: высота ~ 18 нм, диаметр основания ~ 20 нм, радиус кривизны вершины ~ 2 нм.

Как показали исследования, плотность тока эмиссии зависит от ряда факторов, но при этом уравнение Фаулера—Норгейма позволяет описать около 95 % случаев АЭЭ.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований ток эмиссии подчиняется эмпирическому закону:

$$i_3 = K_3 U_3^{m/n},$$

где K_3 — коэффициент эмиссии; U_3 — напряжение эмиссии; $m = 1...7$; $n = 1; 2$.

Вне зависимости от U_3 при каждом измерении i_3 виды эмиссии различны:

$$i_3 = f \left\{ \sqrt{U_3}; U_3; U_3^2 \right\}.$$

При давлениях газовой среды в диапазоне значений $10^3...10^5$ Па в отдельных экспериментах при увеличении U_3 ток эмиссии был постоянным, что свидетельствует об ионизации газовой среды. Для обеспечения устойчивой работы НТЭМП рабочее давление газовой

среды выбрано равным 10^3 Па, что позволяет использовать стандартные корпуса микросхем.

Выводы. Предложен принципиально новый НТЭМП с АЭЭ для измерения тепловых полей малой интенсивности терагерцовой и ИК-областей спектра путем преобразования его в механическую деформацию биметаллической пластины, установленной на микроминиатюрной опоре, с последующим преобразованием этой деформации в электрический сигнал с помощью АЭЭ.

Разработан и экспериментально проверен способ локальной инициализации вискера по переменному току после окончательного формирования механической структуры ЧЭ НТЭМП, что позволяет значительно снизить трудоемкость и повысить процент выхода годных изделий.

Проведенные исследования ВАХ НТЭМП с АЭЭ показали, что ток эмиссии пропорционален $U_0^{m/n}$. При этом во всех случаях АЭЭ $m = 1 \dots 7$, $n = 1; 2$.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта от 13 сентября 2011 г. № 16.523.12.3006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрайден Д. ж. Современные датчики: справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.
2. Пат. РФ № 2447411. Способ изменения температуры, термоэлектронно-механический преобразователь с автоэлектронной эмиссией и способ его изготовления / В.А. Солдатенков, Ю.К. Грузевич, В.М. Ачильдиев. Оpubл. 10.04.2012.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
4. Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Харьков: Основа, 1991. 272 с.
5. Егоров Н. В., Шешин Е. П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. М.: Издательский дом «Интеллект», 2011. 704 с.
6. Сливков И. Н., Михайлов В. И., Сидоров А. И., Настюха А. И. Электрический пробой и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1966. 298 с.
7. Дюжев Н. А., Тишин Ю. П. Молибденовая и кремниевая технология плоских экранов. М.: Электроника. № 1. 2001. С. 50–53.
8. Татаренко Н. И., Кравченко А. Ф. Автоэмиссионные структуры и приборы на их основе. М.: Физмалит, 2006. 192 с.
9. Пестов Ю. И., Макин В. С. Лазерно-индуцированное формирование конусообразных выступов на поверхности сверхтугоплавких металлов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 6. С. 34–42.
10. Гаврилов С. А., Рошин В. М., Шевяков В. И. Наноструктуры и элементы наноэлектроники на базе метода локального зондового окисления // Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А.Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. С. 77–96.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012.