

УДК 539.23

## ПОЛУПРОЗРАЧНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ЗОЛОТА

© Д. А. Колосовский, С. В. Старинский

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1  
E-mail: danil-ak@yandex.ru*

Продемонстрирована возможность создания полупрозрачного нагревателя на основе тонких плёнок золота. Плёнка золота толщиной 15 нм с поверхностным сопротивлением 3,5 Ом/□ и коэффициентом пропускания в видимом диапазоне 0,4 была напылена на кварцевую подложку методом импульсного лазерного осаждения. Максимальная температура нагрева полупрозрачного нагревателя составила 113 °С при подаваемой мощности 1,2 Вт. При подаче напряжения скорость нагрева варьировалась в диапазоне 1–2 °С/с, а при приближении температуры к стационарному состоянию быстро падала.

*Ключевые слова:* золото, тонкие плёнки, прозрачный нагреватель.

DOI: 10.15372/AUT20240404

EDN: GUSNJJ

**Введение.** Прозрачные нагреватели (ПН) — это визуально прозрачные устройства, содержащие электропроводящие слои. Когда электрический ток протекает через электропроводящие слои, ПН генерирует тепло согласно закону Джоуля — Ленца. Тепло можно эффективно использовать во многих устройствах: «умных» окнах, антиобледенителях, обогревателях, дисплеях, датчиках и т. д. Умные окна могут снизить потери энергии в зданиях, на долю которых приходится более 40 % потребляемой энергии в настоящее время. Это достигается благодаря специальным функциональным покрытиям, которые могут регулировать поступающую солнечную энергию в ответ на тепло (термохромные материалы) [1, 2]. Это тепло может генерироваться ПН внутри умных окон [3]. Прозрачные нагреватели могут обеспечить тепло, необходимое для поддержания рабочей температуры или защиты от запотевания/обледенения жидкокристаллических дисплеев при низких температурах.

Среди ключевых параметров и характеристик ПН в технологических приложениях выделяют: время термического отклика, температуру установившегося состояния, однородность, механические свойства (при испытаниях на изгиб и/или растяжение), циклическую/термическую/электрическую стабильность (включая старение), оптические свойства, используемый материал, размер ПН и, наконец, общую стоимость изготовления (включая как материалы, так и технологические процессы изготовления). Параметры ПН могут существенно различаться в зависимости от целевых приложений. Например, умные окна, ветровые стёкла или дисплеи требуют, чтобы ПН и связанные с ними подложки демонстрировали высокую оптическую прозрачность и низкую мутность (определяемую как соотношение между рассеянным и полным пропусканием света) в видимом диапазоне. В то же время в таких приложениях не требуется высокая температура. Термохромный переход в умных окнах (т. е. переход металл—изолятор), связанный с гибридизированным VO<sub>2</sub>/графеном, составляет около 60 °С [4]. Для борьбы с обледенением или запотеванием температура нагрева обычно не превышает 30 °. Другие приложения ПН, например быстрое размораживание в автомобилях или газовых датчиках, требуют гораздо более высокие температуры порядка 100 °С [5].

Единственная технология изготовления ПН, использовавшаяся до 1995 г., была основана на плёнках прозрачных проводящих оксидов (ППО), которые также широко применялись в качестве прозрачных электродов (ПЭ) во многих приложениях, включая фотогальванику [6], умные окна [7], эффективное освещение [8] или дисплеи [7, 9–11]. Тремя основными материалами ППО являются оксид индия и олова (ИТО) [12–14], оксид олова, легированный фтором (FTO) [15, 16], и оксид цинка, легированный алюминием (AZO) [17–19]. Прозрачные проводящие оксиды обычно представляют собой вырожденные полупроводники  $n$ -типа, которые обладают высокой электропроводностью  $10^3$ – $10^4$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$  [10]. Прозрачные проводящие оксиды могут демонстрировать хорошие или даже отличные характеристики с точки зрения компромисса между электропроводностью и оптической прозрачностью в видимом диапазоне. Два основных недостатка ППО заключаются в негибкости и низком оптическом пропускании в ближнем инфракрасном диапазоне из-за плазмонного поглощения [14, 20]. Однако в ряде приложений требуются гибкие растяжимые ПН, которые можно использовать в термотерапии [21, 22] — популярном методе физиотерапии, особенно полезном при лечении травм суставов. Для таких применений ПН также должны быть мягкими, тонкими и лёгкими, чтобы не доставлять дискомфорт пациентам. Поэтому большое внимание было уделено гибким и прозрачным электродам/нагревателям [23].

Для применения в ПН были исследованы новые материалы, включая наноматериалы на основе углерода/углеродных нанотрубок [24] и графена [25]. Эти материалы достаточно распространены, а ПН, изготовленные из углерода/углеродных нанотрубок/графена, являются гибкими. С 2012 г. начались активные исследования ПН на основе сетей металлических нанопроволок (НП) [26–29] и интеграция этого типа ПН в различные устройства [30–32]. Достигнут прогресс в области проводящих полимеров, которые можно рассматривать как очень эффективные материалы для ПН [33]. В [34] сообщалось о самом первом эффективном ПН, изготовленном на основе исключительно тонких плёнок проводящих полимеров. Ведутся активные исследования многослойных материалов или нанокмполитов, которые могут сочетать в себе преимущества различных материалов. Показано, что высокопроизводительные и гибкие многослойные материалы ИТО/Ag/ИТО имеют высокий оптический коэффициент пропускания (88,2 %), низкое поверхностное сопротивление (3 Ом/□) и могут быть эффективно интегрированы в устройство ПН [35]. Многослойные материалы ИТО/Cu/ИТО также могут демонстрировать перспективные электрические и оптические характеристики и хорошую интеграцию с ПН [36].

Несмотря на интенсивный поиск новых материалов для применения в ПН, в научной литературе остаётся нерассмотренным вопрос использования тонких сплошных металлических плёнок в качестве электропроводящего слоя ПН. В то же время тонкие металлические плёнки обладают всеми необходимыми параметрами для ПН. Ещё одним преимуществом ПН на основе тонких металлических плёнок является простота изготовления. Нанесение металлической плёнки — одноэтапный процесс, который включает в себя нанесение тонкого слоя металла на поверхность подложки в вакууме. В сравнении с этим создание нанопроволок или металлических сеток часто включает в себя более сложные технологические многостадийные процессы и дополнительные этапы подготовки материалов. Перспективным вариантом электропроводящего слоя ПН являются тонкие плёнки золота, которые обладают достаточной гибкостью и механической прочностью [37], высоким коэффициентом пропускания электромагнитного излучения [38] и низким поверхностным сопротивлением [39]. Также золото — один из самых инертных материалов. При нормальных условиях оно не образует оксидов и не взаимодействует с окружающей средой и большинством кислот. Кроме того, преимуществом ПН на основе тонких плёнок золота является простота интеграции в кремниевую электронику. Прозрачные тонкоплёночные золотые электроды уже используются в органических светодиодах [40], солнечных батареях [41] и фотоприёмниках [42]. Все вышеперечисленные свойства делают золото

перспективным материалом для применения в твёрдых и гибких ПН.

Поскольку при разработке ПН необходимо учитывать стоимость изготовления, технология изготовления должна быть максимально экономичной. К классическим методам напыления золотых плёнок относятся технологии термовакuumного напыления или электронно-лучевого осаждения. Однако технология импульсного лазерного осаждения (ИЛО) является более перспективной и экономически выгодной. Ранее лазерное осаждение считалось экономически невыгодным, поскольку начальная стоимость лазерных источников многие десятилетия не позволяла рассматривать их для массового производства. Поэтому долгие годы лазеры применяли только в научных задачах. С развитием технологий происходило постепенное снижение стоимости источников, что привело к использованию лазеров как в повседневной жизни (офтальмология, стоматология и косметология), так и в инженерии (экологический и химический анализы, метрология и репрография, прецизионный контроль) и в военно-промышленном комплексе (связь, навигация и наведение). Один источник лазерного излучения может применяться в разных задачах, что делает лазерные технологии экономически выгодными. Например, один лазер может использоваться как для напыления, так и для лазерного сверления, и лазерной сварки. Непосредственно в ПН один источник лазерного излучения может применяться как для напыления плёнки, так и для её перфорации. Перфорация металлической плёнки позволяет существенно повысить коэффициент пропускания [43] и получить из непрозрачной плёнки полупрозрачную и наоборот. Если для напыления использовать технологии термовакuumного напыления или электронно-лучевого осаждения, то тогда необходимо иметь две различные установки: одну для напыления, вторую для перфорации, что существенно повысит производственные затраты и стоимость ПН на основе перфорированных металлических плёнок, по сравнению с лазерными технологиями.

Цель представленной работы — демонстрация возможности изготовления полупрозрачного нагревателя (ППН) на основе тонких плёнок золота, напылённых методом ИЛО. Изготовлен макет ППН и показаны его характеристики.

**Изготовление макета ППН.** Для создания макета ППН тонкие плёнки золота напылялись на подложку плавленого кварца методом импульсного лазерного осаждения. Объёмная золотая мишень (чистота 99,99 %) помещалась в вакуумную камеру и облучалась при давлении 2 Па импульсами Nd:YAG-лазера (длина волны 532 нм, длительность импульса 7 нс, частота 7 Гц) с плотностью энергии 10 Дж/см<sup>2</sup>. Аблированный материал собирался на кварцевой подложке, расположенной на расстоянии 15 мм от мишени. Общее количество лазерных импульсов при осаждении составило 3393. Напыление плёнки золота происходило при комнатной температуре, чтобы избежать формирования крупных частиц [44].

Перед нанесением плёнок мишень и кварцевые подложки подвергались специальной процедуре очистки: в течение 30 мин ультразвуковая (УЗ) обработка в воде с добавлением лауретсульфата натрия (анионное поверхностно-активное вещество (ПАВ)); 15-минутная УЗ-обработка в дистиллированной воде с заменой воды каждые 5 мин; 30-минутная УЗ-обработка в этиловом спирте; 15-минутная УЗ-обработка в дистиллированной воде с заменой воды каждые 5 мин.

Напыление сплошных проводящих тонких плёнок золота на кварцевую подложку является трудоёмкой задачей. Поскольку поверхностная энергия золота меньше поверхностных энергий кремния и кварца [45, 46], рост плёнки происходит по механизму Вольмера — Вебера [47]. На начальной стадии роста плёнки адатомы золота группируются и образуют изолированные островки. Такая плёнка обладает прерывистой структурой с шероховатой морфологией и низкой электропроводностью. По мере продолжения осаждения изолированные островки увеличиваются в размерах и в конечном итоге сливаются, образуя сплошную проводящую плёнку золота. Переход от прерывистой структуры к сплошной



Рис. 1. Схематическое изображение макета ППН с припаянными контактами

происходит при толщине плёнки золота 10 нм [48]. Чтобы избежать влияния прерывистой структуры на параметры ППН, на подложку кварца напылялась плёнка золота толщиной 15 нм. Контроль толщины осуществлялся *ex situ* анализом спектров пропускания плёнки в УФ-диапазоне по методике, подробно описанной в [44].

После напыления к плёнке припаивались два контакта (рис. 1) для нагрева и измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ). Для избежания разрывов плёнки золота и образования отдельных частиц в области контактов при нагреве использовался индиевый припой (чистота 99,99 %) с относительно низкой температурой плавления 156 °С. В качестве источника напряжения применялся источник питания SPS-1820. Измерение температуры нагрева ППН осуществлялось тепловизионной камерой NEC TH7102IR (длина волны 8–14 мкм) с макрообъективом TH 71-377. Тепловизионная камера фиксировалась на фокусном расстоянии 6 см от исследуемого объекта. Полученные данные обрабатывались программным обеспечением ThermoTracer. Измерения температуры нагрева ППН проводились в высокотемпературном диапазоне. Погрешность измерения температуры составляла 5 %.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 2, *a* представлено фото тонкой плёнки золота, напылённой на кварцевую подложку. Под подложку помещён лист бумаги с надписью «А(3)» (цифра указывает на размер шрифта). Надпись сквозь плёнку хорошо видно, что подтверждает прозрачность плёнки. На рисунке 2, *b* показан спектр пропускания тонкой плёнки золота. Среднее значение коэффициента пропускания в видимом диапазоне

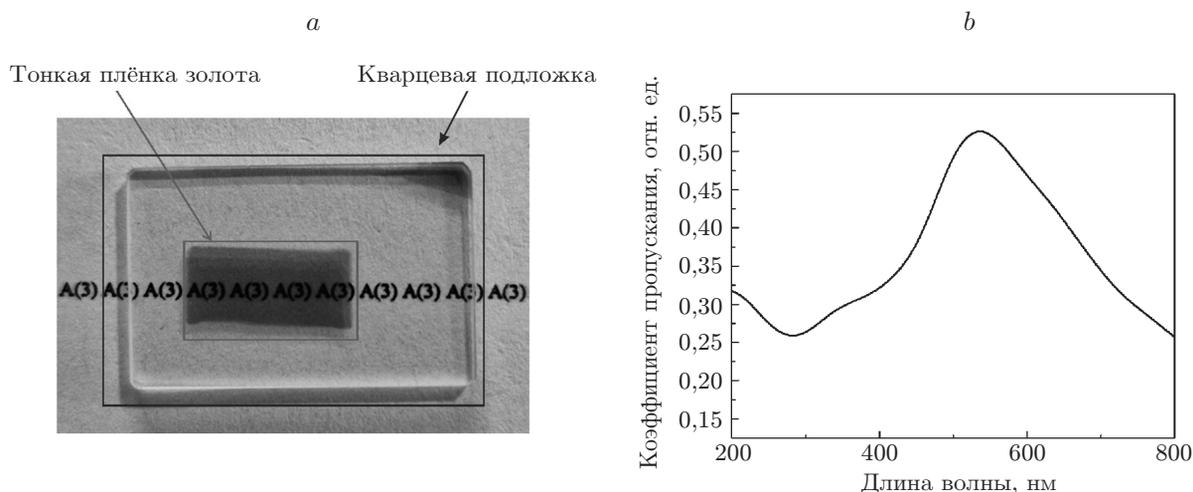


Рис. 2. Тонкая плёнка золота, напылённая на кварцевую подложку методом ИЛО: *a* — фото тонкой плёнки золота, *b* — спектр пропускания тонкой плёнки золота

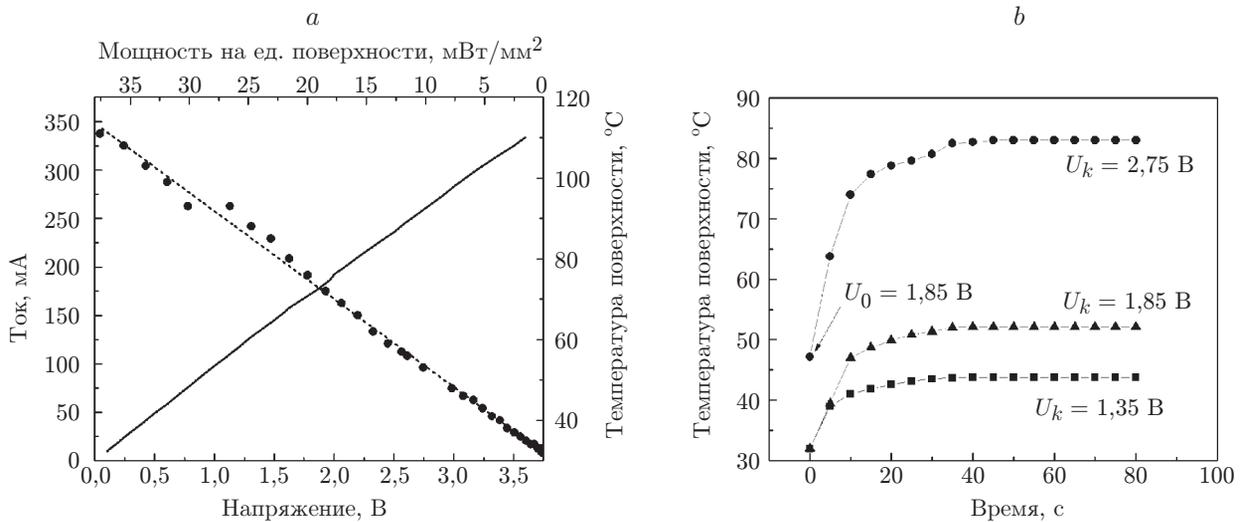


Рис. 3. Характеристики макета ППН: *a* — ВАХ и зависимость температуры поверхности макета ППН от подаваемой мощности на единицу площади (ВАХ представлена на рисунке сплошной линией, зависимость температуры поверхности от подаваемой мощности на единицу площади — пунктирной), *b* — зависимости температуры поверхности макета ППН от времени для разных поданных напряжений. Квадратами и треугольниками показан нагрев макета ППН при подаче напряжения  $U_k = 1,35$  В и  $U_k = 1,85$  В, кружками — нагрев макета ППН при повышении напряжения с 1,85 до 2,75 В

(380–780 нм) составило 0,4. Уменьшение коэффициента пропускания в УФ-области спектра обусловлено возбуждением внутренних переходов. По мере увеличения длины волны вклад отклика валентных электронов ослабевает, в то же время энергия фотонов остаётся ещё достаточно высокой для возбуждения электронов проводимости [44]. Это приводит к возникновению пика прозрачности в середине оптического диапазона. Дальнейшее уменьшение энергии фотонов обеспечивает, согласно теории Друде — Зоммерфельда [49], включение в процесс всё большего количества электронов проводимости, и прозрачность материала уменьшается. Поверхностное сопротивление плёнки составило 3,5 Ом/□.

На рис. 3, *a* сплошной линией представлена ВАХ, а пунктирной — зависимость установившейся температуры поверхности ППН от подаваемой мощности на единицу поверхности. Измерения проводились в помещении с температурой 32 °C и влажностью воздуха 28 %. Видно, что зависимости ведут себя линейно. Максимальная температура нагрева в эксперименте составила 113 °C при подаваемой мощности 1,2 Вт (3,6 В, 334 мА). Дальнейший нагрев макета ППН не проводился.

На рис. 3, *b* представлены зависимости температуры поверхности макета ППН от времени для разных поданных напряжений ( $U_k$ ). Из графика видно, что для всех поданных напряжений температура быстро возрастает с увеличением прошедшего времени до достижения установившейся температуры, которая, в свою очередь, возрастает с увеличением поданного напряжения. В течение первых 10 с происходит быстрый нагрев со скоростью 1–2 °C/с, что сравнимо с ПН на основе ИТО [50]. Далее при приближении и выходе температуры на стационарное значение скорость нагрева быстро падает. В случае нагрева ППН со стационарного состояния (начальное напряжение  $U_0 = 1,85$  В) поведение зависимости аналогично.

**Обсуждение результатов.** В таблице представлено сравнение параметров различных ПН, описанных в научной литературе. Видно, что тонкоплёночный золотой ППН

Таблица

## Сравнение параметров прозрачных нагревателей

Материал электропроводящего слоя	Подложка	Площадь, см <sup>2</sup>	Напряжение, В	Температура, °С	Поверхностное сопротивление, Ом/□	T, %	Источник
ППО							
Наночастицы ITO FTO	Полиэфир	—	50	180	2500	>90%	[51]
	ПЭТ	5 × 10	12	39	253	88	[52]
Оксид цинка, легированный галлием	Стекло	11	12	88	—	>90%	[53]
		2 × 2	42	90	—	90	[53]
Металл/FTO FTO/AZO	Стекло	2,5 × 3,5	12	116	26,85	86	[54]
	Стекло	2,5 × 2,5	12	72	36,7	82	[55]
Углеродные наноструктуры							
Многостенные углеродные нанотрубки	ПЭТ/Стекло	0,65 × 0,85	15	77	699	83	[56]
Одностенные углеродные нанотрубки	ПЭТ/Стекло	4 × 4	12	~95	580	79	[24]
	Стекло	1 × 1	60	47	2600	95	[57]
Отожжённый оксид графена	Кварц/ Полиимид	2 × 1,4	60	206	641	81	[58]
Легированный графен	ПЭТ	4 × 4	12	100	43	89	[59]
	Стекло	2 × 2	12	110	66	90	[60]
Графен	Полиимид	2,5 × 2,5	—	60	520	70	[61]
Металлические сетки и нанопроволоки							
НП Ag	Стекло/ПЭТ	2,5 × 2,5	7	55	33	90	[26]
	ПЭТ/Стекло	25 × 20	7	100	10	90	[32]
Сетка Au	Кварц	2,5 × 2,5	15	600	5,4	87	[62]
	ПЭТ	1 × 1	0,8	72	2	60	[63]
	ПЭТ	3,5 × 2,5	—	110	7	86	[64]
Сетка Ag	Кварц	2,5 × 2,5	6	85	6	82	[65]
	Стекло	2,5 × 2,5	9	167	1	77	[66]
	ПЭТ	3 × 4	10	105	20	70	[67]
	Выпуклая линза	~28	5	105	1,49	78	[68]
Гибридные материалы							
Одностенные углеродные нанотрубки и НП Ag	ПЭТ	4 × 4	15	110	~50	~85	[69]
НП Ag и одностенные углеродные нанотрубки	Пластик	—	15	150	~20	>90	[70]
Сетка Ag и ITO НП Ag и полиимид	ПЭТ	3 × 4	12	43	300	88	[71]
	—	5 × 5	7	130	25	86	[72]
НП Ag и поли(3,4- этилендиокситиофен) полистиролсульфонат	Стекло/ПЭТ	5 × 6	4	86	4	70	[73]

(ТПЗППН) в представленной конфигурации сопоставим и в некоторых параметрах превосходит уже имеющиеся ПН. У ТПЗППН достаточно низкое поверхностное сопротивление. Только у ПН на основе металлических сеток встречается более низкое поверхностное сопротивление. Максимальная температура нагрева ТПЗППН составила 113 °С, что является средним значением в числе уже имеющихся ПН. Однако стоит отметить, что в данной конфигурации максимальная температура нагрева ограничена индиевым припоем. Температура плавления индия составляет ~156 °С. При замене припоя на тугоплавкий металл можно ожидать максимальную температуру нагрева около 200 °С. Дальнейший нагрев приведёт к принципиальному изменению морфологии плёнки с образованием крупных агломератов [44] и деградации ППН.

Для изготовления ПН и ППН на основе тонких плёнок золота, работающих при температурах выше 200 °С, необходимо предотвратить формирование кластеров золота. Это можно сделать, подобрав подложку с большей поверхностной энергией, чем у золота. Однако прозрачную подложку с такой характеристикой найти сложно. Анализ литературных данных по стандартным бинарным соединениям показал, что такие подложки либо непрозрачны, либо их поверхностная энергия ниже, чем у золота [74]. Поэтому необходимо рассматривать подложки, состоящие из трёх и более химических элементов, или повышать поверхностную энергию стандартных подложек, используя осаждение наночастиц, наноструктур и смачивающих слоёв, которые будут действовать как ПАВ.

При разработке ПН и ППН важно учитывать стоимость изготовления, поэтому технология должна быть максимально экономичной. Использование сложных подложек удорожает производство, поэтому применение ПАВ полностью оправдано. В качестве ПАВ используют такие материалы, как титан, хром, никель, платина или германий [75], оксиды металлов, в том числе оксид меди и оксид цинка, легированный алюминием [38, 76], дихалькогениды переходных металлов [77], органические молекулы, включая меркаптосилан [78], и полимеры [79]. Метод ИЛО позволяет осажать в одном технологическом процессе как плёнки ПАВ, так и плёнки золота на поверхность подложки. Это даёт методу ИЛО дополнительное преимущество перед классическими методами термовакуумного напыления или электронно-лучевого осаждения при изготовлении ПН и ППН.

Стоит отметить, что для каждой конкретной задачи можно оптимизировать конфигурацию ТПЗППН. Например, для использования ТПЗППН в умных окнах или для борьбы с запотеванием/обледенением можно либо уменьшить толщину плёнки, либо провести её перфорацию, что повысит коэффициент пропускания [38, 43]. Однако перфорация, как и уменьшение толщины, приведёт к увеличению поверхностного сопротивления [39, 43], что влечёт за собой снижение мощности. В приложениях, где не требуется нагрев до высоких температур, такие нагреватели можно рассматривать в качестве альтернативы уже имеющимся.

**Заключение.** В представленной работе продемонстрирована возможность создания полупрозрачного нагревателя на основе тонких плёнок золота. Плёнка золота толщиной 15 нм с коэффициентом пропускания в видимом диапазоне 0,4 и поверхностным сопротивлением 3,5 Ом/□ была нанесена на кварцевую подложку методом импульсного лазерного осаждения. Максимальная температура нагрева полупрозрачного нагревателя составила 113 °С при подаваемой мощности 1,2 Вт. При подаче напряжения скорость нагрева варьировалась в диапазоне 1–2 °С/с, а при приближении температуры к стационарному состоянию быстро снижалась.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-620 Министерства науки и высшего образования РФ (напыление плёнок золота) и государственного задания ИТ СО РАН им. С. С. Кутателадзе № 121031800218-5 (диагностические методики).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Long S., Cao X., Sun G. et al.** Effects of  $V_2O_3$  buffer layers on sputtered  $VO_2$  smart windows: Improved thermochromic properties, tunable width of hysteresis loops and enhanced durability // *Appl. Surf. Sci.* 2018. **441**. P. 764–772.
2. **Long L., Ye H.** How to be smart and energy efficient: A general discussion on thermochromic windows // *Sci. Rep.* 2014. **4**. 6427. DOI: 10.1038/srep06427.
3. **Heinilehto S. T., Lappalainen J. H., Jantunen H. M., Lantto V.** IR-wavelength optical shutter based on ITO/ $VO_2$ /ITO thin film stack // *Journ. Electroceramics*. 2011. **27**, Iss. 1. P. 7–12.
4. **Kim H., Kim Y., Kim K. S.** Flexible thermochromic window based on hybridized  $VO_2$ /graphene // *ACS Nano*. 2013. **7**, Iss. 7. P. 5769–5776.
5. **Chen X., Nie S., Guo W. et al.** Printable High-Aspect Ratio and High-Resolution Cu Grid Flexible Transparent Conductive Film with Figure of Merit over 80 000 // *Adv. Electron. Mater.* 2019. **5**, Iss. 5. DOI: 10.1002/aelm.201800991.
6. **You J., Meng L., Song T.-B. et al.** Improved air stability of perovskite solar cells via solution-processed metal oxide transport layers // *Nat. Nanotechnol.* 2016. **11**. P. 75–81.
7. **Granqvist C. G.** Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices // *Thin Solid Films*. 2014. **564**. P. 1–38.
8. **Gaynor W., Hofmann S., Christoforo M. G. et al.** Color in the corners: ITO-free white OLEDs with angular color stability // *Adv. Mater.* 2013. **25**, Iss. 29. P. 4006–4013.
9. **Gordon R. G.** Criteria for Choosing Transparent Conductors // *MRS Bull.* 2000. **25**, Iss. 8. P. 52–57.
10. **Ellmer K.** Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes // *Nat. Photon.* 2012. **6**, N 12. P. 809–817.
11. **Granqvist C. G.** Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // *Solar Energy Mater. and Solar Cells*. 2007. **91**, Iss. 17. P. 1529–1598.
12. **Park H. J., Kim J., Won J. H. et al.** Tin-doped indium oxide films for highly flexible transparent conducting electrodes // *Thin Solid Films*. 2016. **615**. P. 8–12.
13. **Gwamuri J., Vora A., Mayandi J.** A new method of preparing highly conductive ultra-thin indium tin oxide for plasmonic-enhanced thin film solar photovoltaic devices // *Solar Energy Mater. and Solar Cells*. 2016. **149**. P. 250–257.
14. **Morales-Masis M., De Wolf S., Woods-Robinson R. et al.** Transparent electrodes for efficient optoelectronics // *Adv. Electron. Mater.* 2017. **3**, Iss. 5. DOI: 10.1002/aelm.201600529.
15. **Rey G., TERNON C., Modreanu M. et al.** Electron scattering mechanisms in fluorine-doped  $SnO_2$  thin films // *Journ. Appl. Phys.* 2013. **114**, Iss. 18. 183713.
16. **Consonni V., Rey G., Roussel H. et al.** Preferential orientation of fluorine-doped  $SnO_2$  thin films: The effects of growth temperature // *Acta Materialia*. 2013. **61**, Iss. 1. P. 22–31.
17. **Ellmer K., Klein A., Rech B.** Transparent Conductive Zinc Oxide // *Materials Science*. Eds. by Hull R., Osgood Jr. R. M., Parisi J., Warlimont H. N.-Y.: Springer Berlin — Heidelberg, 2008. Vol. 104. 446 p.
18. **Klein A.** Transparent conducting oxides: Electronic structure-property relationship from photoelectron spectroscopy with *in situ* sample preparation // *Journ. Amer. Cer. Soc.* 2013. **96**, Iss. 2. P. 331–345.
19. **Nguyen V. H., Gottlieb U., Valla A. et al.** Electron tunneling through grain boundaries in transparent conductive oxides and implications for electrical conductivity: The case of  $ZnO:Al$  thin films // *Mater. Horiz.* 2018. **5**, Iss. 4. P. 715–726.

20. **Sannicolo T., Lagrange M., Cabos A. et al.** Metallic nanowire-based transparent electrodes for next generation flexible devices: A review // *Small*. 2016. **12**, Iss. 44. P. 6052–6075.
21. **Choi S., Park J., Hyun W. et al.** Stretchable heater using ligand-exchanged silver nanowire nanocomposite for wearable articular thermotherapy // *ACS Nano*. 2015. **9**, Iss. 6. P. 6626–6633.
22. **Jang N.-S., Kim K.-H., Ha S.-H. et al.** Simple approach to high-performance stretchable heaters based on Kirigami patterning of conductive paper for wearable thermotherapy applications // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. **9**, Iss. 23. P. 19612–19621.
23. **Hecht D. S., Hu L., Irvin G.** Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures // *Adv. Mater.* 2011. **23**, Iss. 13. P. 1482–1513.
24. **Yoon Y.-H., Song J.-W., Kim D. et al.** Transparent film heater using single-walled carbon nanotubes // *Adv. Mater.* 2007. **19**, Iss. 23. P. 4284–4287.
25. **Du J., Pei S., Ma L., Cheng H.-M.** 25th anniversary article: Carbon nanotube- and graphene-based transparent conductive films for optoelectronic devices // *Adv. Mater.* 2014. **26**, Iss. 13. P. 1958–1991.
26. **Celle C., Mayousse C., Moreau E. et al.** Highly flexible transparent film heaters based on random networks of silver nanowires // *Nano Res.* 2012. **5**, Iss. 6. P. 427–433.
27. **Celle C., Cabos A., Fontecave T.** Oxidation of copper nanowire based transparent electrodes in ambient conditions and their stabilization by encapsulation: Application to transparent film heaters // *Nanotechnology*. 2014. **29**, N 8. 085701.
28. **Khan A., Nguyen V. H., Muñoz-Rojas D.** Stability enhancement of silver nanowire networks with conformal ZnO coatings deposited by atmospheric pressure spatial atomic layer deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. **10**, Iss. 22. P. 19208–19217.
29. **Lagrange M., Sannicolo T., Muñoz-Rojas D.** Understanding the mechanisms leading to failure in metallic nanowire-based transparent heaters, and solution for stability enhancement // *Nanotechnology*. 2017. **28**, N 5. 055709.
30. **Hong S., Lee H., Lee J.** Highly stretchable and transparent metal nanowire heater for wearable electronics applications // *Adv. Mater.* 2015. **27**, Iss. 32. P. 4744–4751.
31. **Ergun O., Coskun S., Yusufoglu Y., Unalan H. E.** High-performance, bare silver nanowire network transparent heaters // *Nanotechnology*. 2016. **27**, N 44. 445708.
32. **Kim T., Kim Y. W., Lee H. S.** Uniformly interconnected silver-nanowire networks for transparent film heaters // *Adv. Funct. Mater.* 2013. **23**, Iss. 10. P. 1250–1255.
33. **Gueye M. N., Carella A., Massonnet N.** Structure and dopant engineering in PEDOT thin films: Practical tools for a dramatic conductivity enhancement // *Chem. Mater.* 2016. **28**, Iss. 10. P. 3462–3468.
34. **Gueye M. N., Orcid A. C., Orcid R. D., Simonato J.-P.** All-polymeric flexible transparent heaters // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. **9**, Iss. 32. P. 27250–27256.
35. **Ko E.-H., Kim H.-J., Lee S.-J. et al.** Nano-sized Ag inserted into ITO films prepared by continuous roll-to-roll sputtering for high-performance, flexible, transparent film heaters // *RSC Advances*. 2016. **6**, Iss. 52. P. 46634–46642.
36. **Park S.-H., Lee S.-M., Ko E.-H. et al.** Roll-to-Roll sputtered ITO/Cu/ITO multilayer electrode for flexible, transparent thin film heaters and electrochromic applications // *Sci. Rep.* 2016. **6**. 33868.
37. **Takakuwa M., Fukuda K., Yokota T. et al.** Direct gold bonding for flexible integrated electronics // *Sci. Adv.* 2021. **7**, Iss. 52. DOI: 10.1126/sciadv.abl6228.
38. **Maniyara R. A., Rodrigo D., Yu R. et al.** Tunable plasmons in ultrathin metal films // *Nat. Photon.* 2019. **13**, Iss. 5. P. 328–333.

39. **Lemasters R., Zhang C., Manjare M. et al.** Ultrathin wetting layer-free plasmonic gold films // *ACS Photonics*. 2019. **6**, Iss. 11. P. 2600–2606.
40. **Bi Y.-G., Feng J., Ji J.-H. et al.** Ultrathin and ultrasmooth Au films as transparent electrodes in ITO-free organic light-emitting devices // *Nanoscale*. 2016. **8**, Iss. 19. P. 10010–10015.
41. **Della Gaspera E., Peng Y., Spiccia L. et al.** Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells // *Mater. Sci. & Eng.* 2015. **13**. P. 249–257.
42. **Zheng J.-R., You E.-M., Hu Y.-F. et al.** Ultrabroadband hot-hole photodetector based on ultrathin gold film // *Nanoscale*. 2023. **15**, Iss. 19. P. 8863–8869.
43. **Pavlov D., Syubaev S., Kuchmizhak A. et al.** Direct laser printing of tunable IR resonant nanoantenna arrays // *Appl. Surf. Sci.* 2019. **469**. P. 514–520.
44. **Starinskiy S. V., Safonov A. I., Sulyaeva V. S. et al.** An optical method for determination of the mass thickness of thin gold films with arbitrary morphology // *Thin Solid Films*. 2020. **714**. 138392. DOI: 10.1016/j.tsf.2020.138392.
45. **Ino S.** Stability of multiply twinned particles // *Journ. Phys. Soc. Jap.* 1969. **26**, N 6. P. 1559–1559.
46. **Fowkes F. M.** Calculation of work of adhesion by pair potential summation // *Journ. Colloid and Interface Sci.* 1968. **28**, N 3–4. P. 493–505.
47. **Sennett R. S., Scott G. D.** The structure of evaporated metal films and their optical properties // *JOSA*. 1950. **40**, Iss. 4. P. 203–211.
48. **Schubert S., Meiss J., Müller-Meskamp L., Leo K.** Improvement of transparent metal top electrodes for organic solar cells by introducing a high surface energy seed layer // *Adv. Energy Mater.* 2013. **3**, Iss. 4. P. 438–443.
49. **Amendola V., Pilot R., Frasconi M. et al.** Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: A review // *Journ. Phys.: Condens. Matter*. 2017. **29**, Iss. 20. 203002. DOI 10.1088/1361-648X/aa60f3.
50. **Im K., Cho K., Kim J., Kim S.** Transparent heaters based on solution-processed indium tin oxide nanoparticles // *Thin Solid Films*. 2010. **518**, Iss. 14. P. 3960–3963.
51. **Im K., Chol K., Kwak K. et al.** Flexible transparent heaters with heating films made of indium tin oxide nanoparticles // *Journ. Nanosci. Nanotechnol.* 2013. **13**, N 5. P. 3519–3521.
52. **Hudaya C., Park J. H., Choi W., Lee J. K.** Characteristics of fluorine-doped tin oxide as a transparent heater on PET prepared by ECR-MOCVD // *ECS Trans.* 2013. **53**, N 4. P. 161–166.
53. **Ahn B. D., Oh S. H., Hong D. U. et al.** Transparent Ga-doped zinc oxide-based window heaters fabricated by pulsed laser deposition // *Journ. Cryst. Growth*. 2008. **310**, Iss. 14. P. 3303–3307.
54. **Hudaya C., Jeon B. J., Lee J. K.** High Thermal Performance of SnO<sub>2</sub>:F Thin Transparent Heaters with Scattered Metal Nanodots // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. **7**, Iss. 1. P. 57–61.
55. **Kim A.-Y., Lee K., Park J. H. et al.** Double-layer effect on electrothermal properties of transparent heaters // *Physica Status Solidi (A)*. 2014. **211**, Iss. 8. P. 1923–1927.
56. **Jang H.-S., Jeon S. K., Nahm S. H.** The manufacture of a transparent film heater by spinning multi-walled carbon nanotubes // *Carbon*. 2011. **49**, Iss. 1. P. 111–116.
57. **Kang T. J., Kim T., Seo S. M. et al.** Thickness-dependent thermal resistance of a transparent glass heater with a single-walled carbon nanotube coating // *Carbon*. 2007. **49**, Iss. 4. P. 1087–1093.
58. **Sui D., Huang Y., Huang L. et al.** Flexible and transparent electrothermal film heaters based on graphene materials // *Small*. 2011. **7**, Iss. 22. P. 3186–3192.
59. **Kang J., Kim H., Kim K. S. et al.** High-performance graphene-based transparent flexible heaters // *Nano Lett.* 2011. **11**, Iss. 12. P. 5154–5158.

60. **Bae J. J., Lim S. C., Han G. H. et al.** Heat Dissipation of Transparent Graphene Defoggers // *Adv. Funct. Mater.* 2012. **22**, Iss. 22. P. 4819–4826.
61. **Chen T. L., Ghosh D. S., Marchena M. et al.** Nanopatterned graphene on a polymer substrate by a direct peel-off technique // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015. **7**, Iss. 10. P. 5938–5943.
62. **Rao K. D. M., Kulkarni G. U.** A highly crystalline single Au wire network as a high temperature transparent heater // *Nanoscale.* 2014. **6**, Iss. 11. 5645. DOI: 10.1039/c4nr00869c.
63. **Gupta R., Walia S., Hösel M. et al.** Solution processed large area fabrication of Ag patterns as electrodes for flexible heaters, electrochromics and organic solar cells // *Journ. Mater. Chem. A.* 2014. **2**, Iss. 28. P. 10930–10937.
64. **Gupta R., Rao K. D. M., Srivastava K. et al.** Spray coating of crack templates for the fabrication of transparent conductors and heaters on flat and curved surfaces // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2014. **6**, Iss. 16. P. 13688–13696.
65. **Kiruthika S., Rao K. D. M., Kumar A. et al.** Metal wire network based transparent conducting electrodes fabricated using interconnected crackled layer as template // *Mater. Res. Express.* 2014. **1**, N 2. 026301. DOI: 10.1088/2053-1591/1/2/026301.
66. **Kiruthika S., Gupta R., Kulkarni G. U.** Large area defrosting windows based on electrothermal heating of highly conducting and transmitting Ag wire mesh // *RSC Advances.* 2014. **4**, Iss. 91. P. 49745–49751.
67. **Kwon N., Kim K., Heo J.** Study on Ag mesh/conductive oxide hybrid transparent electrode for film heaters // *Nanotechnology.* 2014. **25**, N 26. 265702. DOI: 10.1088/0957-4484/25/26/265702.
68. **Seong B., Yoo H., Nguyen V. D.** Metal-mesh based transparent electrode on a 3-D curved surface by electrohydrodynamic jet printing // *Journ. Micromechan. and Microeng.* 2014. **24**, Iss. 9. 097002. DOI: 10.1088/0960-1317/24/9/097002.
69. **Kim D., Zhu L., Jeong D.-J.** Transparent flexible heater based on hybrid of carbon nanotubes and silver nanowires // *Carbon.* 2013. **63**. P. 530–536.
70. **Woo J. S., Han J. T., Jung S.** Electrically robust metal nanowire network formation by in-situ interconnection with single-walled carbon nanotubes // *Sci. Rep.* 2014. **4**. 4804. DOI: 10.1038/srep04804.
71. **Kwon N., Kim K., Heo J. et al.** Study on Ag mesh/conductive oxide hybrid transparent electrode for film heaters // *Nanotechnology.* 2014. **25**, N 26. 265702. DOI: 10.1088/0957-4484/25/26/265702.
72. **Lu H.-Y., Chou C.-Y., Wu J.-H. et al.** Highly transparent and flexible polyimide-AgNW hybrid electrodes with excellent thermal stability for electrochromic applications and defogging devices // *Journ. Mater. Chem. C.* 2015. **3**, Iss. 15. P. 3629–3635.
73. **Ji S., He W., Wang K. et al.** Thermal response of transparent silver nanowire/PEDOT:PSS film heaters // *Small.* 2014. **10**, Iss. 23. P. 4951–4960.
74. **Overbury S. H., Bertrand P. A., Somorjai G. A.** Surface composition of binary systems. Prediction of surface phase diagrams of solid solutions // *Chem. Rev.* 1975. **75**, Iss. 5. P. 547–560.
75. **Todeschini M., Bastos da Silva Fanta A., Jensen F. et al.** Influence of Ti and Cr Adhesion Layers on Ultrathin Au Films // *ACS Appl. Mater. and Interfaces.* 2017. **9**, Iss. 42. P. 37374–37385.
76. **Xie J., Bi Y., Yeet M. et al.** Epitaxial ultrathin Au films on transparent mica with oxide wetting layer applied to organic light-emitting devices // *Appl. Phys. Lett.* 2017. **114**, Iss. 8. 081902. DOI: 10.1063/1.5082803.
77. **Yakubovsky D. I., Stebunov Yu. V., Kirtaev R. V. et al.** Ultrathin and Ultrasmooth Gold Films on Monolayer MoS<sub>2</sub> // *Adv. Mater. Interfaces.* 2019. **6**, Iss. 13. 1900196. DOI: 10.1002/admi.201900196.

78. **Kossoy A., Merk V., Simakov D. et al.** Optical and Structural Properties of Ultra-thin Gold Films // *Adv. Opt. Mater.* 2014. **3**, Iss. 1. P. 71–77.
79. **Leosson K., Ingason A. S., Agnarsson B. et al.** Ultra-thin gold films on transparent polymers // *Nanophotonics*. 2012. **2**, Iss. 1. P. 3–11.

*Поступила в редакцию 02.07.2024*

*После доработки 07.07.2024*

*Принята к публикации 08.07.2024*

---