

На правах рукописи

Опаричев Евгений Борисович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники**

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент, НИУ «МЭИ»
Каримбеков Мырзамамат Арзиевич

Официальные оппоненты:

Кузнецов Геннадий Дмитриевич
доктор технических наук, профессор кафедры
технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС»

Штерн Максим Юрьевич
кандидат технических наук, научный сотрудник
кафедры материалов функциональной электроники НИУ «МИЭТ»

Ведущее предприятие:

ЗАО «Научно-исследовательский институт материаловедения»

Защита состоится «20» июня 2013 г. в «14» час «30» мин на заседании диссертационного совета Д 212.132.06 при ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» («НИТУ «МИСиС») по адресу: 119049, Москва, Крымский Вал, д.3, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС».

Ваши отзывы на автореферат просим присылать на имя Ученого секретаря по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС».

Автореферат разослан «15» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.132.06
доктор физико-математических наук, доцент

Костишин В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с многообразием применения лазеров (оптических квантовых генераторов) в различных областях науки и техники и расширяющейся перспективой их использования выдвигается актуальная задача – разработка эффективных средств контроля параметров излучения и управления режимом их работы. Возникает необходимость на более высоком уровне контролировать у лазеров основные параметры – мощность, энергию и т.д. Особенно важным и проблематичным является создание *чувствительных приёмно-преобразующих элементов – преобразователей* для измерения мощности и энергии непрерывного и импульсного высокочастотного лазерного излучения превосходящих по быстродействию фотоэлектрические преобразователи, а по диапазону спектральной чувствительности термоэлектрические (термопарные) преобразователи. В этом направлении накоплен большой и разнообразный опыт физических экспериментов и технического конструирования, однако, только на уровне поискового характера и без желательного обобщённого материаловедческого и технологического подхода, приводящего к достаточно рациональному практическому решению проблем.

Для измерения параметров лазерного излучения, несомненно, перспективны *наклонноконденсированные плёнки на электроизолирующих и теплопроводящих подложках*. Они неселективны в широком спектральном диапазоне, обладают высоким быстродействием, выдерживают потоки излучения большой плотности, несложны и удобны в эксплуатации. Принцип действия наклонноконденсированных плёнок заключается в возникновении термоэдс в плёнке в направлении параллельном подложке под действием падающего на её поверхность излучения. Условием появления этого эффекта в плёнках является наличие в них анизотропии термоэлектрических свойств. *Анизотропный (поперечный) термоэлектрический эффект* определяется главным образом наклонной микроструктурой, относительным контактным электросопротивлением и теплосоппротивлением на границах кристаллитов. Возможность получения искусственно анизотропных плёнок открывает перспективы создания преобразователей на основе разнообразных материалов – полупроводников (теллур), полуметаллов (висмут) и металлов (хром, никель и тантал), что во многом обеспечивает достижение требуемой совокупности параметров.

Наиболее успешной и технически целесообразной представляется разработка преобразователей на основе медно-никелевых термоэлектродных сплавов МНМц 43-0,5 (копель) и МНМц 40-1,5 (константан). Эти сплавы выделяются среди других сплавов высоким абсолютным значением термоэдс и малой теплопроводностью, величина отношения которых является одним из критериев эффективности материала для изготовления преобразователей. Копель и константан имеют сравнительно высокую температуру плавления, жароустойчивы и коррозионноустойчивы. Данные качества позволяют плёнкам этих сплавов выдерживать излучение высокой интенсивности. Положительной особенностью этих сплавов является малая величина температурного коэффициента электросопротивления, что имеет большое значение при согласовании преобразователей с измерительной аппаратурой. Производство медно-никелевых сплавов освоено отечественной промышленностью, они имеют низкую стоимость и недефицитны.

Диссертационная работа выполнена в рамках Федеральных целевых научно-технических программ: «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы (по лоту 1 – «Проведение научных исследований молодыми учеными». «Индустрия наносистем и материалы») на тему «Материаловедческо-технологическая разработка плёночных термоэлектрических приёмно-преобразующих элементов для измерителей температуры, в том числе температуры поверхности»; «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (по лоту 13 – «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области лазерных, плазменных и пучковых технологий для

атомной техники») по теме «Исследование процесса взаимодействия мощных электронных пучков с металлическими материалами, разработка оборудования и технологических основ электронно-лучевой сварки деталей большой толщины».

Цель и задачи работы. Целью данной работы является исследование условий получения методом конденсации в вакууме изотропных (по структуре) плёнок медно-никелевых сплавов копель и константан на электроизолирующих и теплопроводных подложках и разработка на их основе эффективных плёночных анизотропных (по текстуре из-за наклонной конденсации) термоэлектрических преобразователей лазерного излучения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- установление возможности получения чувствительных к излучению плёнок сплавов копель и константан методом термического испарения и конденсации в вакууме на подложки, наклонно установленные относительно потока паров испаряемого материала;

- исследование особенностей испарения медно-никелевых сплавов копель и константан и выбор оптимального метода испарения для получения плёнок аналогичного состава;

- выявление особенностей микроструктуры наклонноконденсированных плёнок изучаемых сплавов методами оптической и электронной микроскопии, а также рентгеновской дифрактометрии;

- исследование зависимости характера микроструктуры и анизотропии термоэлектрических свойств плёнок копей и константана от условий конденсации;

- исследования влияния последующей термообработки на анизотропию электрических свойств и величину поперечной термоэдс в наклонноконденсированных плёнках копей и константана;

- разработка преобразователей различной конструкции (в зависимости от целевого назначения), изготовление опытных образцов, проведение испытаний, внедрение разработанного метода в опытно-промышленное производство.

Научная новизна. В ходе выполнения работы получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- предложены комплексные критерии эффективности материалов для изготовления преобразователей на основе наклонноконденсированных пленок, отличающиеся тем, что в них, к традиционно учитываемым свойствам таким, как коэффициент термоэдс – α_0 , удельное электрическое сопротивление – ρ_0 , удельная теплопроводность – κ_0 , добавлено ещё одно важное свойство – удельная теплоёмкость (c). Это позволяет при различном функциональном назначении однозначно определять эффективность материала плёнок;

- используя предложенные в работе комплексные критерии эффективности материалов для изготовления преобразователей, обоснована возможность получения чувствительных к излучению анизотропных плёнок на основе медно-никелевых сплавов копель и константан методом наклонной конденсации в вакууме. Эти материалы обладают самыми высокими критериями эффективности в ряду типичных металлов и сплавов, они температуро- и коррозионно-устойчивы и имеют малый температурный коэффициент электрического сопротивления. При выборе материалов учитывалась склонность к образованию пластинчатой или волокнистой микроструктуры при наклонной конденсации в вакууме, технологичность и эксплуатационные свойства.

- предложено модельное представление, описываемое дифференциальным уравнением в частных производных, подобным уравнению конвективной диффузии, решение которого методом неявной разностной схемы и использования итерационного метода позволило получить расчётные зависимости состава паров и концентрации легколетучего компонента на поверхности расплава от времени испарения для конкретных сплавов. Это дало возможность оценить целесообразность применения метода термического испарения при отсутствии перемешивания расплава для конкретных сплавов с целью получения плёнок без изменения состава;

- экспериментально определены зависимости характера микроструктуры, анизотропии термоэлектрических свойств и поперечной термоэдс в наклонноконденсированных пленках

копеля от условий конденсации. Насыщение поперечной термоэдс наблюдается при температуре конденсации 295 К, скорости конденсации 0,6... 1 нм/с, толщине пленки 1 мкм. Оптимальный угол наклона текстуры относительно нормали подложки 88°.

Практическая значимость. Определены оптимальные условия получения плёнок медно-никелевых сплавов копель и константан с искусственно наведённой анизотропией термоэлектрических свойств методом наклонной конденсации в вакууме.

Разработаны и изготовлены образцы пленочных термоэлектрических преобразователей круглого, квадратного, матричного и полоскового типа для измерения пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

Изготовлены быстродействующие преобразователи, обладающие временем разрешения 3... 5 нс.

На защиту выносятся следующие положения:

- при определении перспективности *наклонноконденсированных плёнок медно-никелевых сплавов* для преобразователей в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к ним, определяющим фактором анизотропного термоэлектрического эффекта в плёнках является наличие наклонной микроструктуры и относительного контактного электрического и теплового сопротивления между кристаллитами;

- температура конденсации 295 К, скорость конденсации 0,6... 1 нм/с (при испарении навески с прямонакального испарителя), при толщине пленки 1 мкм. и оптимальном угле наклона текстуры относительно нормали подложки 88° – это оптимальные условия, позволяющие получать термочувствительные наклонноконденсированные плёнки копеля для преобразователей с высокими функциональными параметрами;

- отжиг наклонноконденсированных плёнок, копеля при температуре отжига 453±5 К в течении 20...25 мин, приводит к увеличению чувствительности к излучению в 1,2... 1,5 раз и значительно уменьшается разброс электрического сопротивления и поперечной термоэдс.

- выявленные закономерности при формировании наклонноконденсированных пленок медно-никелевых сплавов обеспечивают высокую воспроизводимость метода получения и управляемое производство эффективных преобразователей типа МНМц 43-0,5 (копель).

Обоснованность и достоверность работы. Основные научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются материаловедческими исследованиями и экспериментами, проверкой преобразователей на лабораторных и промышленных стендах, показавшими удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Апробация работы. III Международ. конф. по физике кристаллов «Кристаллофизика 21-го века», посвященных памяти М.П.Шаскольской (МИСиС ТУ) (20-26 ноября 2006 г., Москва); XI, XII и XIII Национ. конф. по росту кристаллов (НКРК-2004, НКРК-2006 и НКРК-2008) (13-17 декабря 2004 г., 23-27 октября 2006 г. и 17-22 ноября 2008 г., Москва); X Международн. конф. по физике и технологии тонких пленок (МКФТП-Х) (16-21 мая 2005 г., Ивано-Франковск, Украина); 6-я Международ. конф. «Рост монокристаллов и теплоперенос» (ICSC-2005) (25-30 сентября 2005 г., Обнинск); Пятая Международн. научно-технич. конф. «Электроника и информатика-2005» (К 40-летию МИЭТ ТУ) (23-25 ноября 2005 г., Зеленоград); 10-я Международ. научн. конф. и школа-семинар «Актуальные проблемы твёрдотельной электроники и микроэлектроники» (ПЭМ-2006) (24-29 сентября 2006 г., Дивноморское); III Всеросс. конф. «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах» (ФАГРАН-2006) (8-14 октября 2006 г., Воронеж); III Международная школа «Физическое материаловедение». Наноматериалы технического и медицинского назначения (24-28 сентября 2007 г, Самара, Тольятти, Ульяновск, Казань); Научно-методологический семинар «Шумовые и деграционные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология, учебный процесс)» (МТН радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова и МЭИ ТУ) (27-28 ноября 2007 г., Москва); Тринадцатая, Четырнадцатая, Пятнадцатая, Шестнадцатая, Восемнадцатая и Девятнадцатая Международн. научно-технич. конф.

студентов и аспирантов МЭИ (ГУ) (2007-210 гг., 2012 г. и 2013 г., Москва); XVI Всеросс. межвуз. научно-технич. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (22-24 апреля 2009 г., Зеленоград).

Кроме того, основное содержание диссертации отражено в 30 публикациях: 1 статье, опубликованной в журнале «Известия вузов. Электроника»; 1 статье, опубликованной в журнале «Известия Кыргызского технического университета (Кыргызская Республика); в 6 статьях, опубликованных в журнале «Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России»; 1 статье, опубликованной в журнале «Технология металлов»; в 21 тезисах докладов и в 1 изобретении.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из Введения, Глав 1-4 и Выводов. Имеется список литературных ссылок.

В диссертации 188 страницы, включающие 60 рис. и 10 табл. Библиография содержит 293 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАКЛОННОКОНДЕНСИРОВАННЫЕ ПЛЁНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Требования к преобразователям. Измеритель мощности и энергии лазерного излучения – преобразователь, или чувствительный приёмно-преобразующий элемент – должен отвечать специфическим требованиям:

- использовать несложные физические эффекты (ограниченное число физических принципов);
- использовать достаточно простые материалы и методики; а также
- должен иметь широкополосный спектральный диапазон (неселективный тип);
- должен иметь достаточно большую чувствительность и обнаружительную способность; должен обладать высоким быстродействием (малоинерционный тип);
- должен обладать оптимальным электросопротивлением для согласования с информационно-измерительной системой; должен обладать высокой лучевой прочностью (устойчивость против «вжигания» и «прокисления»).

К существенным специфическим характеристикам относятся возможность работы:

- без принудительного охлаждения и
- без источника питания.

Так работают плёночные термоэлектрические преобразователи: термопарные преобразователи (на термопарном эффекте) и преобразователи на наклонноконденсированных плёнках (на эффекте поперечной термоэдс).

Предложенные модельные представления характеристик для наклонноконденсированных термоэлектрических материалов. Если ограничиться тремя свойствами (α – коэффициент термоэдс, ρ – удельное электросопротивление и k – удельная теплопроводность), то для разного функционального назначения и условий комплексные критерии могут иметь разный вид. Комплексный критерий α^2/ρ – получил название коэффициента термоэлектрической мощности, а комплексный критерий $\alpha^2/\rho k_0$ – термоэлектрической добротности (классические комплексные критерии).

Для наклонноконденсированных плёнок добавим к учитываемым свойствам, таким как, коэффициент термоэдс – α_0 , удельное электросопротивление – ρ_0 и удельная теплопроводность – k_0 , ещё одно свойство – удельную теплоёмкость – c и, для различных функциональных назначений, получим два новых критерия эффективности материалов плёнок: c/k_0 – по времени отклика на скачок мощности излучения и α_0/c – по характеристичному времени переходного процесса.

Основные параметры, характеристики и комплексные критерии выбора материалов преобразователей на наклонноконденсированных плёнках. Рассмотрены особенности структуры наклонноконденсированных плёнок и природа возникающего в них анизотропного термоэлектрического эффекта (Рис. 1). Показано, что такие плёнки могут быть представлены в виде однородной анизотропной среды.

Компоненты тензора коэффициента термоэдс, удельного электросопротивления и удельной теплопроводности для неё (в микроструктурной системе координат) равны

$$\begin{aligned} \alpha_{11}^{(z)} &= \alpha_{22}^{(z)} = \alpha_0 / (1 + r_k); & \alpha_{33}^{(z)} &= \alpha_0 \\ \rho_{11}^{(z)} &= \rho_{22}^{(z)} = \rho_0 / (1 + r_k); & \rho_{33}^{(z)} &= \rho_0 \\ \kappa_{11}^{(z)} &= \kappa_{22}^{(z)} = \kappa_0 / (1 + r_k); & \kappa_{33}^{(z)} &= \kappa_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где α_0 , ρ_0 и κ_0 – коэффициенты термоэдс, удельного электросопротивления и теплопроводности материала плёнки соответственно; r_k – относительное контактное электрическое сопротивление границ кристаллитов.

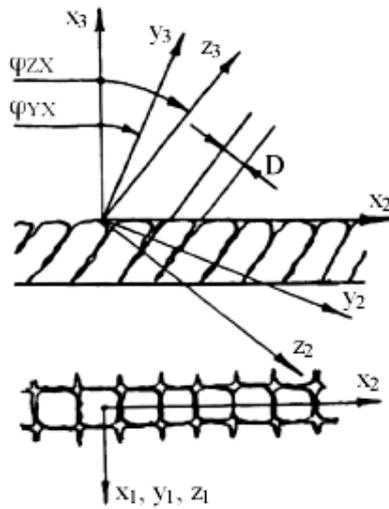


Рис. 1. Схема микроструктуры наклонно конденсированной пленки: (x_1, x_2, x_3) – физическая (лабораторная), (y_1, y_2, y_3) – кристаллографическая и (z_1, z_2, z_3) – микроструктурная система координат

Для таких пленок величина анизотропной термоэдс $E_{23}^{(X)}$, возникающей вдоль оси X_2 при градиенте температуры вдоль оси X_3 определяется выражением:

$$E_{23}^{(X)} = \frac{1}{2} \varepsilon_n q L \cdot \frac{r_k \sin 2\varphi_{ZX}}{1 + r_k \cos^2 \varphi_{ZX}} \cdot \frac{\alpha_0}{\kappa_0}, \quad (2)$$

где φ_{ZX} – угол наклона продольной оси волокон к нормали поверхности пленки, ε_n – степень черноты поверхности пленки, q – плотность потока падающего излучения и L – длина пленки.

Для сопоставления пленок по величине генерируемой электродвижущей силы при падении излучения введено понятие удельной анизотропной (поперечной) термоэдс

$$e_n = \frac{E_{23}^{(X)}}{\varepsilon_n q L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_k \sin 2\varphi_{ZX}}{1 + r_k \cos^2 \varphi_{ZX}} \cdot \frac{\alpha_0}{\kappa_0}. \quad (3)$$

Используя выражения (1-3) для наклонноконденсированных плёнок, получены соотношения, устанавливающие связь между параметрами, характеризующими анизотропные преобразователи как преобразователи излучения, и параметрами, определяющими микроструктурные характеристики наклонноконденсированных плёнок.

Важными параметрами анизотропных преобразователей как преобразователей излучения являются: удельная вольт-ваттная чувствительность – s , постоянная времени –

$\tau_{хар}$, амплитуда импульсной реакции – $A_{имп} = \epsilon_{п}/\tau_{хар}$, и коэффициент преобразования мощности – η . Эти параметры зависят от угла наклона кристаллитов к нормали поверхности плёнки – φ_{zx} следующим образом:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_k \sin 2\varphi_{zx}}{1 + r_k \cos^2 \varphi_{zx}} \cdot \epsilon L \cdot \frac{\alpha_0}{\kappa_0} = f_s \cdot \epsilon L \cdot \frac{\alpha_0}{\kappa_0}, \quad (4)$$

$$\tau_{хар} = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{1 + r_k}{1 + r_k \cos^2 \varphi_{zx}} \cdot t^2 \cdot \frac{c}{\kappa_0} = f_{\tau} \cdot t^2 \cdot \frac{c}{\kappa_0}, \quad (5)$$

$$A_{умп} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{r_k \sin 2\varphi_{zx}}{1 + r_k} \cdot \frac{1}{t^2} \cdot \frac{\alpha_0}{c} = f_A \cdot \frac{1}{t^2} \cdot \frac{\alpha_0}{c}, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{8} \cdot \frac{r_k \sin^2 2\varphi_{zx}}{(1 + r_k \cos^2 \varphi_{zx})^3} \cdot \epsilon^2 q t \cdot \frac{\alpha_0^2}{\rho_0 \kappa_0^2} = f_{\eta} \cdot \epsilon^2 q t \cdot \frac{\alpha_0^2}{\rho_0 \kappa_0^2} \quad (7)$$

Помимо этих параметров были введены ещё два параметра. Они характеризуют, лучевую стойкость преобразователей: максимальная плотность непрерывного теплового потока излучения – Q и максимальная плотность излучения в импульсе – \mathcal{E} , выдерживаемые наклонноконденсированными плёнками без разрушения:

$$Q = \frac{1 + r_k \cos^2 \varphi_{zx}}{1 + r_k} \cdot \frac{T_{пл} - T_0}{\epsilon t} \cdot \kappa_0 = f_Q \cdot \frac{T_{пл} - T_0}{\epsilon t} \cdot \kappa_0, \quad (8)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 + r_k \cos^2 \varphi_{zx}}{1 + r_k} \cdot \frac{T_{пл} - T_0}{\epsilon \sqrt{\tau_u}} \cdot \alpha_0 \sqrt{c}} = f_E \cdot \frac{T_{пл} - T_0}{\epsilon \sqrt{\tau_u}} \cdot \kappa_0 \sqrt{c}, \quad (9)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления материала наклонноконденсированной плёнки, T_0 – температура плёнки на границе с подложкой, τ_u – длительность импульса излучения.

Выражения (4-9) позволяют расчётным путём оценить параметры преобразователя излучения, а также оптимальные микроструктурные (угол наклона кристаллитов, контактное электрическое сопротивление) характеристики наклонноконденсированных плёнок в зависимости от конкретных требований к таким преобразователям.

Характер зависимости метрологических параметров преобразователей от угла наклона кристаллитов в плёнке и относительного контактного электросопротивления и теплосопротивления между ними определяется безразмерными, функциями, стоящими вначале правых частей выражений (4-9). Вид этих зависимостей представлен на рис. 2.

Коэффициенты, представляющие собой соотношения свойств материалов α_0/κ_0 , c/κ_0 , α_0/c , $\alpha_0^2/\rho_0 \kappa_0^2$, κ_0 и $\kappa_0 \sqrt{c}$ соответственно в выражениях (4-9), характеризуют эффективность конкретного материала для преобразователя. Это позволяет использовать данные коэффициенты в качестве комплексных критериев эффективности материалов для изготовления преобразователей.

При выборе материалов для изготовления преобразователей необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- склонность материала образовывать пластинчатую или волокнистую микроструктуру при наклонной конденсации в вакууме;
- критерии эффективности материала для преобразователей;
- технологичность и
- эксплуатационные свойства материала.

В данном случае технологичность материалов оценивается следующими параметрами: температурой начала испарения, характером взаимодействия расплава с материалом испарителя, загрязнением парама материала вакуумной системы и склонностью к диспропорционированию при испарении.

Проведенная оценка по указанным факторам ряда материалов (приемлемых с точки зрения технологических параметров) показывает перспективность использования для создания

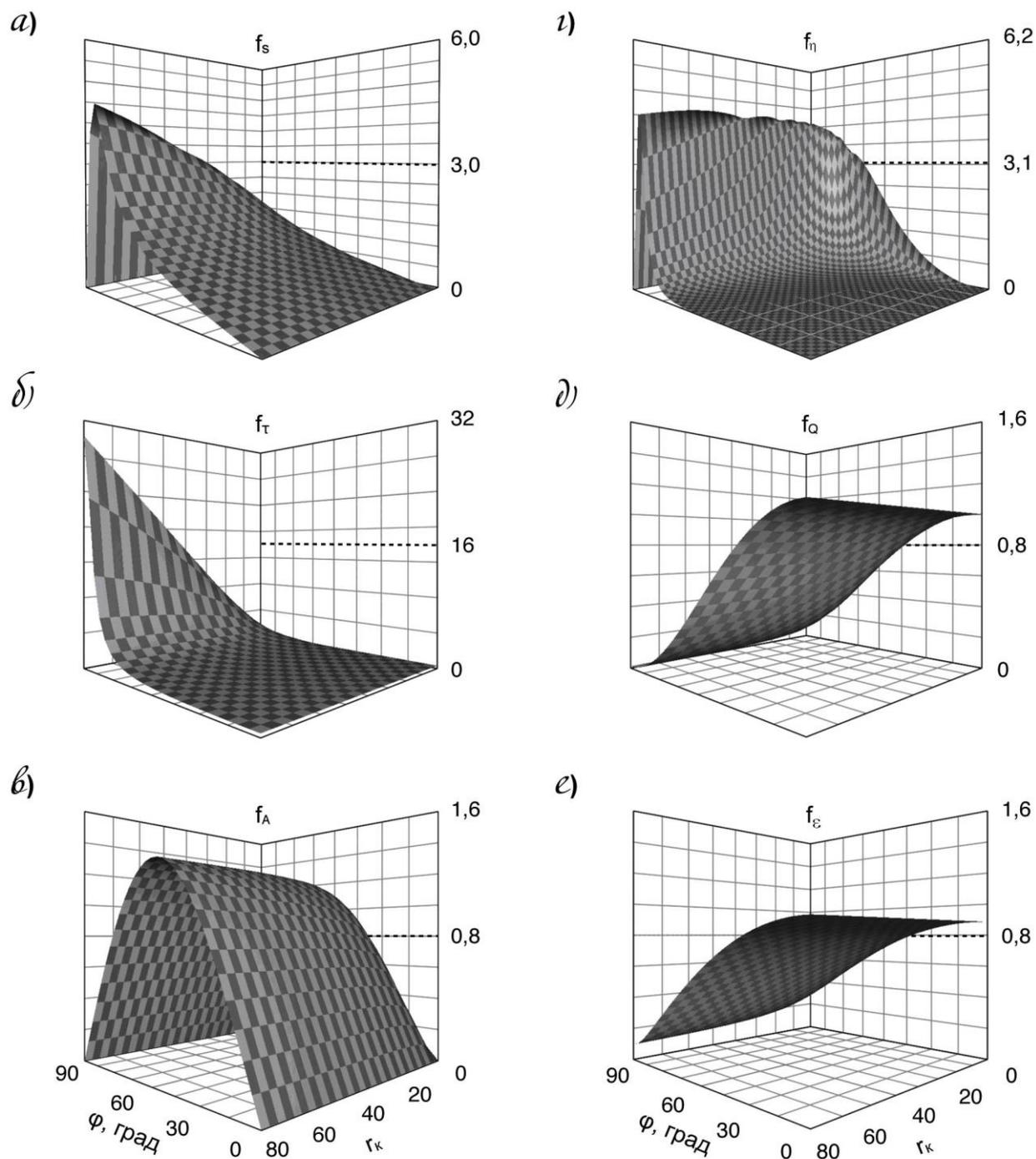


Рис. 2. Вид безразмерных функций, определяющих характер зависимости вольт-ваттной чувствительности (а), постоянной времени (б), амплитуды импульсной реакции (в), эффективности преобразования мощности излучения (з), предельной плотности непрерывного теплового потока излучения (д) и максимальной плотности импульсного излучения в импульсе (е) от угла наклона кристаллитов наклонноконденсированной плёнки и контактного электрического сопротивления между ними

преобразователей медно-никелевых термоэлектродных сплавов копель и константан. Они обладают самыми высокими критериями эффективности в ряду типичных металлов и сплавов, имеют малый температурный коэффициент электросопротивления, температуро- и коррозионноустойчивы.

Обобщённые данные и проведённый анализ показывают, что среди медно-никелевых сплавов константан и, в особенности, копель по своему составу являются наиболее перспективными для изготовления преобразователей.

Особенности испарения двухкомпонентных сплавов. Проведён аналитический обзор имеющихся в литературе данных об общих закономерностях испарения двухкомпонентных сплавов. Подробно рассмотрены случаи испарения с интенсивным перемешиванием расплава и в его полном отсутствии (рис. 3).

Для случая интенсивного перемешивания проведён расчёт, позволяющий построить кривые зависимости состава паров над расплавом от времени испарения для конкретных сплавов. Определены условия, позволяющие реализовать рассматриваемые методы испарения сплавов, и критерии, ограничивающие применимость данных методов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ, КОНДЕНСАЦИИ И ОТЖИГА, МИКРОСТРУКТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Методика экспериментов исследований и измерений. Осаждение плёнок проводилось методом термического испарения в вакууме и конденсации паров на подложку, установленную перпендикулярно потоку паров. Использовалась установка вакуумного напыления типа УВН-2М. Давление остаточных газов в рабочей камере поддерживалось в интервале $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па. При испарении сплава использовались прямонакальные испарители нескольких типов и алундовый испаритель в виде тигля с радиационным нагревом от перфорированного нагревателя из молибденовой фольги.

Испарение осуществлялось тремя способами: испарение навески в виде гранул сплава с прямонакальных испарителей, испарение из тигля и методом взрывного испарения («метод вспышки»). В качестве подложек использовались круглые пластины (диаметр 42 мм и толщина 2 мм) из керамики на основе окиси бериллия («брокерит»), нитрида алюминия, слюды, ситалла, стекла и сапфира. Микроструктура плёнок исследовалась методом оптической и электронной микроскопии, а также рентгеновской дифрактометрии. Анализ химического состава плёнок проводился методом спектрометрии и рентгеновского микроанализа. Электросопротивление плёнок измерялось стандартными методами с помощью цифровых приборов. Поперечная термоэдс в наклонноконденсированных плёнках измерялось при облучении поверхности плёнок ИК-лампой и лазерами с длиной волны 1,06 мкм и 10,6 мкм.

Исследование особенностей испарения медно-никелевого термоэлектродного сплава. При испарении с прямонакального испарителя массу загрузки сплава ограничивали в связи с тем, что никель, входящий в состав копеля, в расплавленном состоянии образует сплавы с тугоплавкими металлами, что приводит к разрушению испарителей.

Установлено, что для получения хорошей адгезии, плёнки необходимо конденсировать при температуре не менее 373 К.

При испарении сплава наблюдалось диспропорционирование его компонентов, обусловленное различием в давлении насыщенных паров меди и никеля. Сопоставление экспериментальной зависимости состава паров над расплавом от времени испарения с расчётной зависимостью позволяет заключить, что испарение сплава с прямонакального испарителя сопровождается интенсивным перемешиванием расплава. Полученные таким образом плёнки являются слоистыми и неоднородными по составу. Проведённый расчёт показывает, что при испарении с перемешиванием расплава довольно однородные по составу плёнки можно получать только в том случае, когда содержание никеля невелико ($\leq 20\%$), что несомненно ограничивает область применения данного метода.

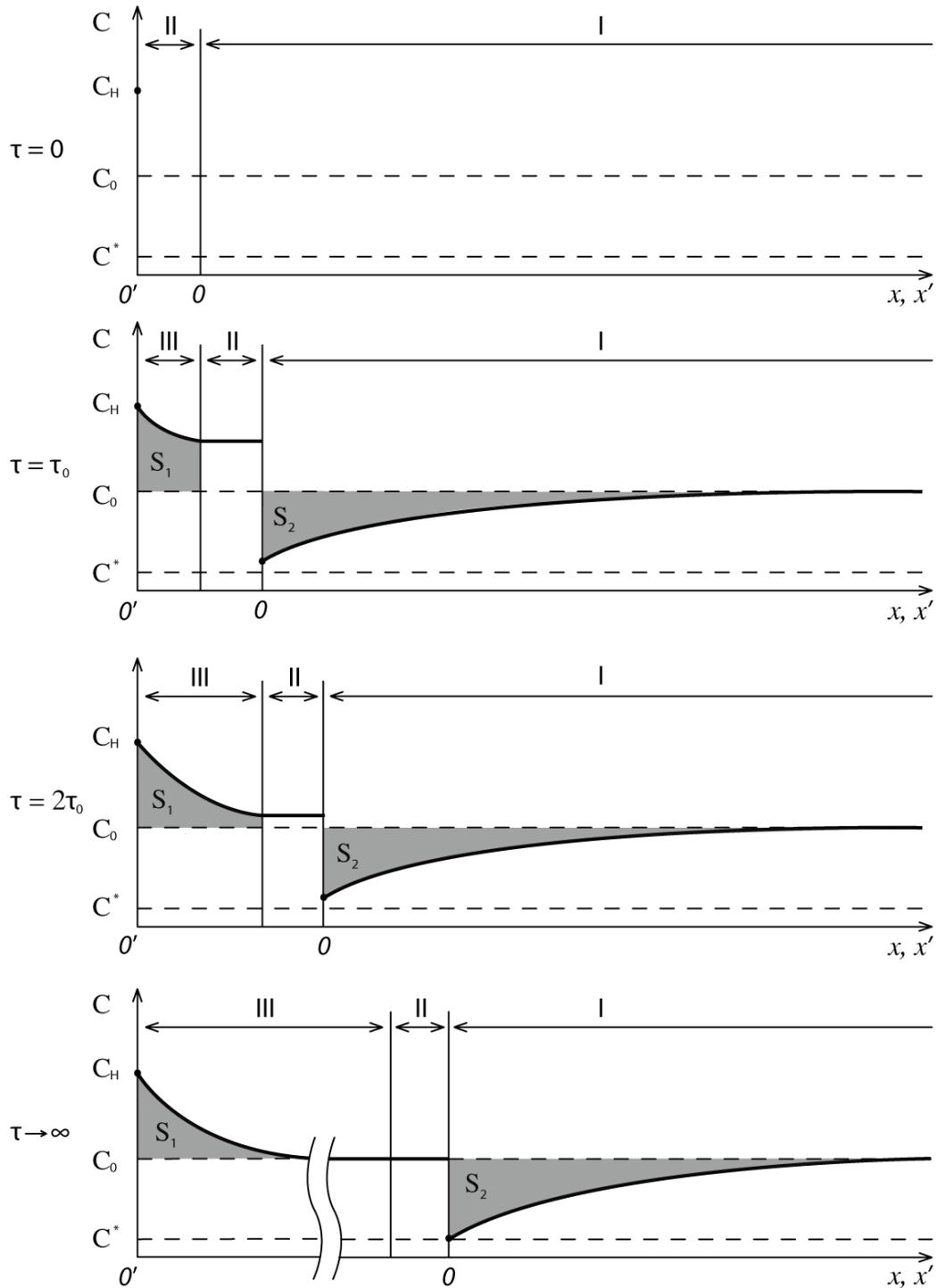


Рис. 3. Схема распределения легколетучего компонента вблизи поверхности расплава и по толщине конденсата в различные моменты испарения сплава в отсутствие перемешивания расплава (I – расплав, II – пар, III – конденсат). Поперечное сечение контейнера с расплавом равно поперечному сечению конденсата (пленки). Глубина расплава – x . Толщина конденсата – x' . Заштрихованная площадка S_1 – дополнительно улетучившееся количество легколетучего компонента равно заштрихованной площадке S_2 – избыток легколетучего компонента в конденсате

Процесс испарения сплава из тигля при отсутствии перемешивания описывается дифференциальным уравнением в частных производных, подобным уравнению конвективной диффузии. С помощью представления данного уравнения методом неявной разностной схемы и использования итерационного метода получены расчётные зависимости состава паров и концентрации легколетучего компонента на поверхности расплава от времени испарения для конкретных сплавов.

Для получения плёнок, близких по составу к исходному сплаву, метод испарения из тигля в отсутствие перемешивания расплава целесообразно применять в том случае, если соотношение скоростей испарения компонентов сплава невелико. Для сплава копель эта величина в интервале температур 1800... 2000К колеблется в пределах значений 60... 52. Для достижения начала режима псевдоконгруэнтного испарения при этих температурах требуется значительное время (≥ 20 мин). Для получения высоких скоростей испарения и быстрого установления режима псевдоконгруэнтного испарения, необходимо повышать температуру тигля до ~ 2400 К. Осуществление равномерного нагрева тигля диаметром 5 мм и длиной 40 мм до этой температуры и её поддержание в течение времени, необходимого для нанесения плёнки (5... 10 мин), технически сложно. Это делает неудобным применение данного метода для получения плёнок сплавов медно-никелевых сплавов с составом, равным составу исходного материала.

При испарении методом вспышки использован вибрационный питатель со спиральным желобом, приводимый в действие электромагнитным способом. Порошок сплава с размером частиц 50... 100 мкм подавался на ленточный прямонакальный испаритель из вольфрамовой или молибденовой фольги. Оптимальная скорость подачи порошка лежит в интервале $(0,8... 4) \cdot 10^{-2}$ г/с. Химический состав плёнок копеля, полученных методом вспышки при указанных, скоростях подачи порошка на испаритель, совпадает с составом исходного сплава в пределах погрешности измерения (менее 3%). При испарении медно-никелевых сплавов метод вспышки является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет реализовать высокую скорость конденсации (> 10 нм/с), а также регулировать её в широких пределах.

Влияние условий конденсации и отжига на микроструктуру и электрические свойства плёнок. Повышение температуры конденсации при испарении загрузки медно-никелевого сплава с прямонакального испарителя приводит к уменьшению слоистой неоднородности плёнок. Значение величины коэффициента термоэдс в плёнке с увеличением температуры конденсации приближается к значению этой величины для исходного сплава. Удельное электросопротивление плёнок, осажженных при температуре ~ 573 К ($\sim 6,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·см), превосходит его значение для исходного сплава ($\sim 4,8 \cdot 10^{-5}$ Ом·см), что, по-видимому, является следствием увеличения числа межкристаллитных границ в результате рекристаллизации плёнок. Последующий отжиг в вакууме ($T = 473$ К, $\tau = 1$ час) также уменьшает неоднородность плёнок. Высокие температуры конденсации (~ 633 К) с последующей, непосредственно после осаждения, выдержкой в вакууме при той же температуре в течение 25... 30 мин, позволяют получать плёнки с термоэлектрическими свойствами (коэффициент термоэдс, удельное электросопротивление, температурный коэффициент сопротивления) близкими к свойствам массивных образцов.

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЁНОК СПЛАВА МНМц 43-0,5 (КОПЕЛЬ)

Влияние условий наклонной конденсации на микроструктуру и свойства осаждаемых плёнок. При исследовании условий получения анизотропных плёнок сплавов копеля и константана было установлено, что термочувствительные наклонноконденсированные плёнки этих сплавов формируются при одинаковых условиях конденсации, но плёнки константана обладают несколько меньшей ($\sim 20\%$) поперечной термоэдс. Поэтому в качестве материала для преобразователей был выбран копель, и детальная отработка оптимальных условий получения наклонноконденсированных плёнок проводилась для этого сплава.

Анализ наклонноконденсированных плёнок копеля показал, что химический состав плёнок соответствует, в пределах погрешностей измерения, составу исходного сплава. Отсутствие инородных элементов в полученных спектрах говорит о том, что плёнки однородны по составу, а наличие в них относительного контактного электрического сопротивления обусловлено порами и пустотами между кристаллитами. Исследование плёнок на подложках различного типа показали, что эпитаксии плёнок копеля не происходит. Плёнки являются поликристаллическими, и кристаллическая решётка отдельных кристаллитов соответствует по своим параметрам решётке медно-никелевого твердого раствора. Плёнки обладают явно выраженной текстурой с преимущественной ориентацией кристаллографического направления $\langle 111 \rangle$ вблизи нормали к поверхности плёнки.

Для получения плёнок, с максимальной чувствительностью предпочтительной является температура конденсации $\sim 295\text{K}$. При увеличении температуры конденсации величина поперечной термоэдс снижается. Относительное контактное электрическое сопротивление границ кристаллитов также уменьшается с ростом температуры конденсации. Причём величина отношения его значений вдоль и поперёк проекции направления молекулярного пучка на поверхность подложки остается практически постоянной (~ 2) до температуры конденсации $\sim 373\text{K}$, а затем это отношение начинает уменьшаться.

Плёнки копеля, осаждённые на брокеритовые подложки, установленные перпендикулярно потоку паров, имеют блочную структуру с явно выраженными порами (трещинами) по границам блоков-кристаллитов. При увеличении угла наклона подложки к горизонтали размеры кристаллитов несколько уменьшаются. Одновременно с этим межкристаллитные поры увеличиваются и становятся более волнистыми, причём увеличение размеров пор происходит преимущественно в направлении перпендикулярном проекции молекулярного пучка. С увеличением угла наклона нормали подложки относительно потока паров кристаллиты начинают приобретать все более усиливающийся наклон в сторону молекулярного пучка.

Относительное контактное электросопротивление плёнок, конденсированных на подложки при комнатной температуре, возрастает с увеличением угла наклона угла наклона нормали подложки относительно потока паров. Наиболее интенсивное возрастание наблюдается в интервале угла наклона $65 \dots 90^\circ$. Величина коэффициента поглощения излучения также возрастает с увеличением наклона нормали подложки, достигая максимальной величины ($\sim 0,71$) при угле $\sim 90^\circ$. Удельная поперечная термоэдс плёнок начинает быть заметной при угле наклона нормали подложки $\sim 15^\circ$ и усиливается при его увеличении, достигая максимума ($\sim 103 \text{ мкВ}\cdot\text{см}/\text{Вт}$) при величине угла 88° (рис. 4).

Зависимость величины удельной поперечной термоэдс, рассчитанной по экспериментально установленным значениям относительного контактного электрического сопротивления, от угла наклона подложки близка к экспериментально наблюдаемой. Это соответствие подтверждает правильность выдвинутой гипотезы о том, что поперечная термоэдс наклонноконденсированных плёнок определяется их наклонной микроструктурой и контактным электрическим сопротивлением между кристаллитами.

Оптимальная скорость конденсации для получения плёнок с максимальной чувствительностью лежит в интервале $0,6 \dots 1 \text{ нм}/\text{с}$. При повышении скорости конденсации относительное контактное электрическое сопротивление уменьшается, что приводит к снижению поперечной термоэдс. Плёнки, осажденные при скоростях конденсации $\sim 3 \text{ нм}/\text{с}$, имеют плотную структуру, что повышает быстродействие преобразователей, выполненных на их основе.

Увеличение давления остаточных газов в рабочей камере установки вплоть до $\sim 10^{-1} \text{ Па}$ слабо влияет на величину удельной поперечной термоэдс.

Поперечная термоэдс наблюдается уже в плёнках толщиной $\sim 20 \text{ нм}$. С увеличением толщины плёнок её величина возрастает и достигает насыщения при толщинах $\sim 1 \text{ мкм}$.

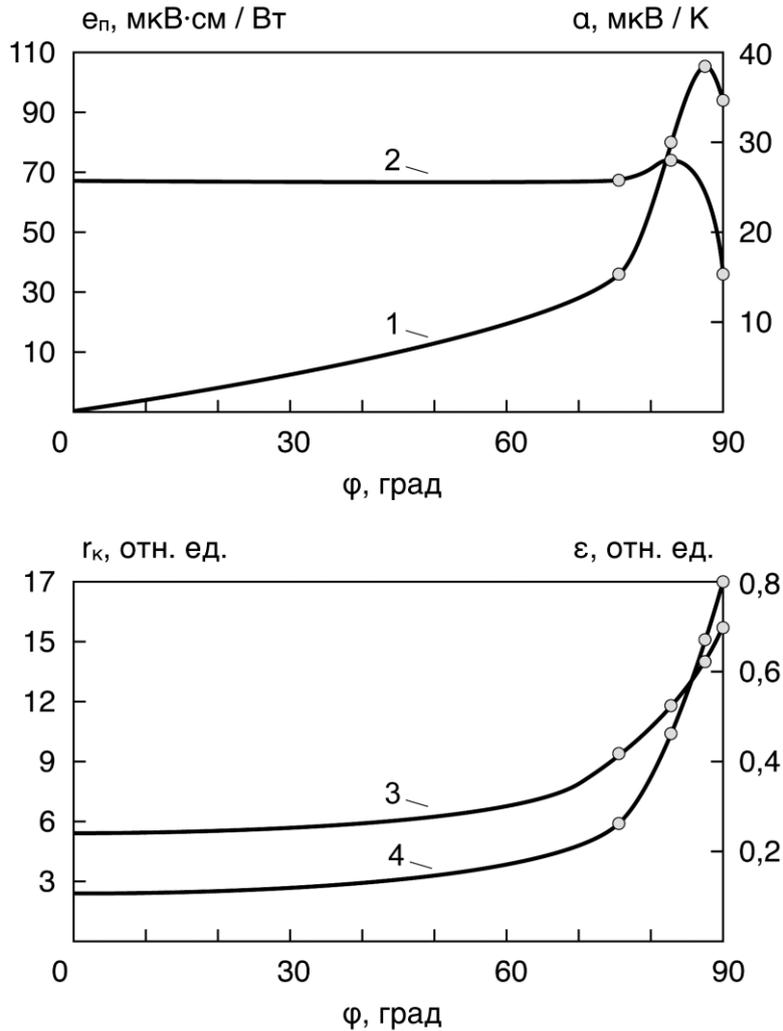


Рис. 4. Экспериментальная зависимость удельной поперечной термоэдс e_n (1) и коэффициента термоэдс α (2), коэффициента поглощения излучения ε (3) и относительного контактного электросопротивления межкристаллитных границ r_k (4) в наклонно-конденсированных плёнках копеля от угла наклона нормали подложки ϕ относительно потока паров

На основании проведённых исследований рекомендованы оптимальные условия осаждения (вакуум, скорость конденсации, температура конденсации) наклонноконденсированных плёнок копеля для преобразователей с различными параметрами.

Влияние условий отжига на анизотропию свойств и поперечную термоэдс наклонноконденсированных плёнок. Температура отжига на воздухе, при которой наступает интенсивное окисление плёнок, существенно зависит от величины угла, под которым осуществлялась конденсация. Для плёнок копеля, осаждённых под углом 85° относительно нормали подложки, температура интенсивного окисления (электросопротивление увеличивается в десятки раз) составляет ~ 523 К, для пленок, осажденных под углом 70° – ~ 573 К.

Отжиг плёнок копеля в течение 20... 25 мин в интервале температур 423... 453 К приводит к образованию на поверхности плёнок защитного окисного слоя, препятствующего дальнейшему окислению плёнок при повторном отжиге. Увеличение коэффициента поглощения, вызванное окислением поверхности плёнки, приводит к увеличению (в 1,2... 1,5 раз) чувствительности этих плёнок к излучению. При увеличении температуры

отжига до 473 К наблюдается равномерное во всех направлениях в плоскости подложки незначительное (в среднем 1,2 раза) повышение электросопротивления.

Отжиг наклонноконденсированных плёнок копеля (температура отжига 453 ± 5 К при времени 20... 25 мин), значительно повышает их чувствительность к излучению, и уменьшает разброс в значениях их параметров (электросопротивления и поперечной термоэдс), что важно при изготовлении на их основе преобразователей излучения.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

Топология и конструкция плёночных термоэлектрических преобразователей различного назначения. На основе наклонноконденсированных плёнок копеля были разработаны и изготовлены опытные образцы плёночных преобразователей лазерного излучения различных конструкций: матричные 100-элементные, широкоапертурные с круглой и квадратной приёмными площадками, полосковые, квадрантные.

Корпусная часть включает в себя основание, на которое крепится подложка, радиаторы для обеспечения отвода тепла, насадку, ограничивающую поток излучения, экран для защиты контактных площадок от излучения, разъём с коммутационными проводами для подключения во внешнюю цепь и т.д., Преобразовательная часть устройства состоит из подложки с контактными площадками одного или нескольких (в зависимости от топологии и конструкции) приёмно-преобразующих элементов. Они, в зависимости от назначения, имеют различную форму и выполняются при помощи трафаретной маски или скрайбированием лазерным лучом.

Матричный 100-элементный преобразователь, предназначенный для исследования лазерных пучков большого диаметра, реализован в модульном исполнении, что даёт возможность в случае необходимости быстро заменить отдельные приёмно-преобразующие элементы. Модуль матричного преобразователя состоит из кассеты с пятью брокеритовыми пластинами 12×14 (мм). На каждой пластине сформированы четыре скомутированных приёмно-преобразующих элемента $4,6 \times 4,6$ (мм) с контактными площадками, соединённые с разъёмом типа ГРПМ-1, прикреплённым к корпусу кассеты. Матричный преобразователь состоит из пяти модулей, которые закрепляются в корпусе и закрываются сетчатым экраном.

Широкоапертурный термоэлектрический преобразователь состоит из брокеритовой подложки диаметром 25... 70 мм, со сформированными на ней медными контактными площадками и приёмно-преобразующим элементом, закреплённым в корпусе с радиатором воздушного охлаждения.

Пленочный анизотропный термоэлектрический преобразователь с квадратной приёмной площадкой 25×25 ... 40×40 (мм) предназначен для встраивания в корпус с воздушным охлаждением. Прямоугольная форма приёмно-преобразующего элемента позволяет собирать на основе этих преобразователей матричные приёмники лазерного излучения для исследования пучков большого диаметра. Термоэлектрический преобразователь, имеющий приёмно-преобразующий элемент квадратной формы 50×50 ... 75×75 (мм), разрезанный лазерным лучом на 50... 75 полосок, соответственно, предназначен для исследования характера распределения энергии в лазерном пучке диаметром 25... 70 мм.

Метод изготовления и приспособление. Плёночные термоэлектрические преобразователи изготавливались наклонной конденсацией плёнок на изолирующие подложки из различных материалов. Подложки из стекла и нитрида алюминия – шайбы диаметром 42 мм и толщиной 2 и 3 мм соответственно. Брокеритовые подложки использовались нескольких типов: шайбы диаметрами 25... 110 мм, толщиной 3 мм и пластины с размерами 25×25 ... 45×45 (мм) и 12×14 (мм), толщиной 1 мм.

Нанесение плёнок на подложки осуществлялось через трафаретные маски.

Для получения полоскового термоэлектрического преобразователя предварительно нанесённый чувствительный элемент разрезался затем лазерным лучом на полосы. Ширина полосы вместе с промежутком составляла 1 мм.

Для нанесения плёнки, подложка помещалась в основание-кассету с накладной трафаретной маской и вставлялась в пазы рамки универсального подложкодержателя. Подложкодержатель устанавливался над источником паров в рабочей камере установки напыления. Медные контактные площадки с подслоем хрома осаждались при горизонтальном положении поворотной рамки подложкодержателя.

У изготовленного термоэлектрического преобразователя измерялись величины электросопротивления и поперечная термоэдс.

Параметры, характеристики и примеры использования. Испытание опытных образцов преобразователей проводили при воздействии излучения от ИК- лампы, а также лазера непрерывного и импульсного излучения с длинами волн 1,06 мкм и 10,6 мкм на измерительном стенде. В режиме модулированной добротности, длительность импульса составляла ~15 нс, в режиме свободной генерации ~150 нс. Результаты проведённых испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики плёночных термоэлектрических преобразователей на основе медно-никелевого сплава МНМц 43-0,5 (копель)

Параметры преобразователя	Типы используемой подложки	
	Керамика на основе BeO ($\varnothing=42$ мм)	Стекло К8 ($\varnothing=42$ мм)
Электросопротивление, Ом	20... 400	1,5... 40
Чувствительность, В/Вт	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Постоянная времени, нс	25... 30	3... 5
Импульсная реакция, В/Дж	55	200
Частота следования импульсов (при мощности излучения 1 МВт), Гц	При длительности импульса $7 \cdot 10^{-7}$ с, 100	При длительности импульса $1 \cdot 10^{-8}$ с, 10
Уровень шумов, мкВ	50	30
Зонная неоднородность, %	2... 3	2... 3
Максимальная плотность излучения, выдерживаемая без разрушения, Вт/см ² : - импульсное излучение 15... 30 нс - непрерывное излучение	$2 \cdot 10^7$ 150	$7 \cdot 10^5$ 50

Копелевые преобразователи применялись также для исследования пространственно-энергетических параметров потока плазмы в установке безвакуумной плазменной очистки типа «Факел». Используемые образцы преобразователей выдерживают прямое многократное воздействие плазменного потока мощностью $\sim 10^7$ Вт в течение $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ с.

Экспериментально исследованы зависимости характера микроструктуры и термоэлектрические свойства наклонноконденсированных плёнок копей от условий конденсации (угла наклона подложки, температуры и скорости конденсации, остаточного давления в рабочей камере и др.). На основании выполненных исследований разработаны условия осаждения термочувствительных плёнок копей при изготовлении плёночных термоэлектрических преобразователей с различными параметрами (см. табл. 2).

Таблица 2

Условия получения термоэлектрических преобразователей на основе медно-никелевых сплавов с высокой чувствительностью и высоким быстродействием

Условия получения	Преобразователь с высокой чувствительностью ($\leq 1,8 \cdot 10^{-5}$ В/Вт)	Преобразователь с высоким быстродействием ($\geq 3 \dots 5$ нс)
Давление в рабочей камере, Па	$10^{-2} \dots 10^{-3}$	$10^{-3} \dots 10^{-4}$
Температура испарения сплава, К	~ 2273	~ 2273
Начальная температура подложки, К	293... 298	293... 298
Скорость конденсации, нм/с	0,6... 1	3... 4
Угол наклона подложки, град.	88 ± 1	75 ± 1
Толщина плёнок, мкм	$\sim 1,0$	$\sim 0,1^*$

* При малой толщине пленки она не становится островковой.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод получения наклонноконденсированных плёнок медно-никелевых термоэлектродных сплавов МНМц 43-0,5 (копель) и МНМц 40-1,5 (константан) для термоэлектрических преобразователей лазерного излучения с чувствительностью $1,5 \cdot 10^{-5} \dots 1,8 \cdot 10^{-5}$ В/Вт, постоянной времени 3...30 нс, позволяющих регистрировать лазерное излучение мощностью 50... 150 Вт/см² (непрерывный режим) и $2 \cdot 10^5 \dots 7 \cdot 10^7$ Вт/см² (импульсный режим).

2. Теоретически и экспериментально обоснована возможность получения чувствительных к излучению анизотропных плёнок на основе медно-никелевых сплавов копель и константан методом наклонной конденсации в вакууме. При выборе материалов учитывалась склонность к образованию пластинчатой или волокнистой микроструктуры при наклонной конденсации в вакууме, технологичность и эксплуатационные свойства.

3. С целью выбора оптимального метода получения анизотропных плёнок исследованы особенности испарения медно-никелевых сплавов копель и константан. Используя предложенную математическую модель, получены расчётные зависимости состава паров, и концентрации легколетучего компонента на поверхности расплава от времени испарения для конкретных сплавов. Это дало возможность оценить целесообразность применения метода термического испарения при отсутствии перемешивания расплава и условия процесса для конкретных сплавов без изменения состава.

4. Методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и др. исследованы особенности микроструктуры наклонноконденсированных плёнок различных сплавов. Показано, что эпитаксии плёнок копей не происходит. Плёнки являются поликристаллическими, и кристаллическая решётка отдельных кристаллитов соответствует по своим параметрам решётке медно-никелевого твердого раствора. Плёнки обладают явно выраженной аксиальной текстурой с преимущественной ориентацией кристаллографического направления <111> вблизи нормали к поверхности плёнки. Плёнки копей, осаждённые на брокеритовые подложки, установленные перпендикулярно потоку паров, имеют блочную структуру с явно выраженными порами (трещинами) по границам блоков-кристаллитов. При увеличении угла наклона подложки к горизонтали размеры кристаллитов несколько уменьшаются.

5. Изучена зависимость термоэлектрических свойств плёнок копей и константана от условий конденсации. Для получения плёнок, с максимальной чувствительностью предпочтительной является температура конденсации ~ 295 К. Относительное контактное электрическое и тепловое сопротивление границ кристаллитов уменьшается с ростом

температуры конденсации. Величина отношения значений параметров вдоль и поперёк проекции направления молекулярного пучка на поверхность подложки остается практически постоянной (~2) до температуры конденсации ~373 К, а затем начинает уменьшаться.

6. Исследовано влияние термообработки на анизотропию электрических свойств и величину поперечной термоэдс в наклонноконденсированных плёнках копеля и константана. Показано, что при отжиге наклонноконденсированных плёнок, копеля (температура отжига 453 ± 5 К при времени 20... 25 мин), чувствительность к излучению повышается в 1,2... 1,5 раз и значительно уменьшается разброс электрического сопротивления и поперечной термоэдс.

7. Разработаны конструкции преобразователей различного назначения и приспособления для изготовления преобразователей на основе наклонноконденсированных плёнок копеля. Изготовлены образцы преобразователей круглого, квадратного, матричного и полоскового типа для измерения пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Основное содержание диссертации достаточно полно опубликовано в следующих публикациях:

1. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Корнилов В.А. Работа над физико-технологической базой данных для пленочных измерительных термоэлектрических преобразователей. – В кн.: Материалы XI Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2004) (13-17 декабря 2004 г., Москва), с. 94. – М: ИК РАН, 2004.

2. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Корнилов В.А. Эффективность экспериментальной базы данных для производства пленочных измерительных термоэлектрических преобразователей. – В кн.: Материалы XI Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2004) (13-17 декабря 2004 г., Москва), с. 98. – М: ИК РАН, 2004.

3. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Термоэлектрическая эффективность пленочных преобразователей из изотропных и анизотропных материалов – В кн.: Тезисы докладов X Международной конференции по физике и технологии тонких пленок (МКФТП-Х) (16-21 мая 2005 г., Ивано-Франковск, Украина), с. 81. – 2005.

4. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В. Выбор материалов и разработка технологии для пленочных преобразователей // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2005. № 3. С. 40-47.

5. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В. Изотропные и анизотропные материалы (висмут, теллур, хром, никель, тантал) для плёночных наклонноконденсированных термопреобразователей // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2005. № 4. С. 98-102.

6. Oparichev A.B., Karimbekov M.A., Vigdorovich V.N., Oparichev E.B. Isotropic and anisotropic materials (bismuth, tellurium, chromium, copel, constantan) for film inclination-condensed thermo-electric converters. – В кн.: «Рост монокристаллов и тепломассоперенос» (ICSC-2005) (25-30 сентября 2005 г., Обнинск). / Сборник трудов 6 ой Международной конференции в 4-х томах. – Обнинск, ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, 2005. – Т.1. – (с. 244-249) 310 с. Т.2. – 242 с. Т.3. – 226 с. Т.4. – 180 с.

7. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б. Микросекундные пленочные термоэлектрические контроллеры лазерного излучения. – В кн.: Материалы V Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика-2005» (23-25 ноября 2005 г., Зеленоград). – М.: МИЭТ, 2005. – Ч.1. – (с.107-108) 272 с. и Ч.2. – 208 с.

8. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Развитие принципов выбора материалов для термоэлектрических преобразователей. – В кн.: Труды 10-ой Международ. научн. конф. и школы-семинара «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (ПЭМ-2006) (24-29 сентября 2006 г., Дивногорское). – Таганрог: ТГРУ, 2006. – Ч.1. – (с. 110-111) 280 с. и Ч.2. – 280 с.

9. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Развитие принципов повышения термоэлектрической эффективности конденсированных плёнок – В кн.: III Всероссийская конференция «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах» (ФАГРАН-2006) (8-14 октября 2006 г, Воронеж). – Воронеж: ВГУ, 2006. – Т.1. – (с. 393-396) 465 с. и Т.2 – 502 с.

10. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Плёночные наклонноконденсированные термоэлектрические преобразователи лазерного излучения из анизотропных (висмут и теллур) и изотропных (хром, никель и тантал) материалов. – В кн.: Материалы XII Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2006) (23-28 октября 2006 г., Москва), с. 501-502. – М.: ИКРАН, 2006. – 536 с.

11. Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Эффективность плёночных термоэлектрических преобразователей на «армированных текстурах» из изотропных и анизотропных материалов. – В кн.: «Кристаллофизика 21-го века». Тезисы докладов III Международной конференции по физике кристаллов, посвященной памяти М.П. Шаскольской (20-26 ноября 2006 г., МИСиС, Москва), с. 72-73. 2006. – 536 с.

12. Опаричев Е.Б., Опаричев А.Б., Нижаде-Гавгани Д.Э., Каримбеков М.А. Получение и применение наклонноконденсированных плёнок Вi, Те, Сг, Ni и Та для контроллеров лазерного излучения, с. 252. – В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тринадцатая Международная конференция студентов и аспирантов (1-2 марта 2007 г., Москва): Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т. 3. – 428 с.

13. Опаричев Е.Б., Опаричев А.Б., Арзиев К.И., Каримбеков М.А. Модельные представления характеристик для термоэлектрических наклонноконденсированных материалов, с. 254-255. – В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тринадцатая Международная конференция студентов и аспирантов (1-2 марта 2007 г., Москва): Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Т. 3. – 428 с.

14. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В., Опаричев А.Б. Опаричев Е.Б. Модельные представления для определения выбора материалов термодинамических термоэлектрических преобразователей // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2007. № 4. С. 54-60.

15. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Опаричев Е.Б., Тимошин Н.В., Опаричев А.Б. Трактовка наногетерогенности материалов. Введение понятия «Коллоидный твердый раствор». – В кн.: Сборник материалов III Международной школы «Физическое материаловедение». Наноматериалы технического и медицинского назначения (24-28 сентября 2007 г, с. 299-303, Самара, Тольятти, Ульяновск, Казань). – Тольятти: ТГУ, 2007. – 382 с.

16. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А., Опаричев А.Б., Вигдорович В.Н. Поведение наклонноконденсированных пленок при нагреве, отжиге и лазерном облучении в воздушной атмосфере. – В кн.: Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология, учебный процесс): Материалы докладов научно-методологического семинара (Москва 27-28 ноября 2007 г.), с. 100-105. — М.: МНТО РЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2008. — 212 с.

17. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б. Разработка контактных контроллеров температуры // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2008. № 1. С. 60-66.

18. Опаричев Е.Б., Тимошин Н.В., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Коллоидные твердые растворы как кристаллические вещества на наноуровне. – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Четырнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов (28-29 февраля 2008 г., Москва): Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Т. 3. С.226-227.

19. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А. Наклонноконденсированные плёнки висмута, теллура, хрома, никеля, тантала, константана и копели при нагреве, отжиге и лазерном облучении в воздушной атмосфере как метаматериалы. – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Четырнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов (28-29 февраля 2008 г., Москва): Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Т. 3. С.228.

20. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А., Вигдорович В.Н. Быстродействующие контроллеры лазерного излучения на наклонноконденсированных плёночных материалах. –

В кн.: Материалы XIII Национальной конференции по росту кристаллов (НКРК-2008) (17-21 ноября 2008 г., Москва), с. 37. – М.: ИК РАН, 2008. – 522 с.

21. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А. Медно-никелевые сплавы – перспективные пленочные материалы для контроллеров лазерного излучения. – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Пятнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов (26-27 февраля 2009 г., Москва): Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Т. 3. С.281-282.

22. Каримбеков М.А., Опаричев Е.Б. Хаотическая составляющая шума измерительных систем как критерий сравнения совершенствования. В кн.: Микроэлектроника и информатика. XVI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов (22-24 апреля 2009 г., Зеленоград), с. 214. – М.: МИЭТ, 2009. – 372 с.

23. Вигдорович В.Н., Кадыров Ч.А., Каримбеков М.А., Опаричев Е.Б. Влияние термической обработки на свойства наклонноконденсированных пленок // Известия Кыргызского технического университета им. И Раззакова. Бишкек. 2009. №17. С.289-292.

24. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А. Разработка анизотропных преобразователей излучения на основе сплава МНМц43-0,5 (копель). – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. Т. 3. С.309-310.

25. Вигдорович В.Н., Опаричев А.Б., Каримбеков М.А., Опаричев Е.Б., Марков Ф.В. Хаотическая составляющая шума измерительных систем как критерий их сравнения и совершенствования // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2010. № 1. С. 94-96.

26. Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б. Классификация пленочных термоэлектрических преобразователей измерительного назначения и критерии их совершенствования // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2010. № 1. С. 96-100.

27. Опаричев Е.Б., Опаричев А.Б., Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Классификация конструкторско-технологических решений плёночных термоэлектрических преобразователей измерительного назначения // Известия вузов. Электроника. – 2010. №3(83). С. 79-81.

28. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А. Исследование влияния условий конденсации и отжига на электрические свойства пленок медно-никелевого сплава (копель). – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восемнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов: В 4-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. Т. 4. С.295.

29. Экспериментальная база данных для постановки производства плёночных термоэлектрических преобразователей измерительного назначения «Физико-технологическая справочная информация». – 2004. – 120 с. (Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б., Корнилов В.А.), см. web-сайт: www.phase.ac.ru/ptp/.

30. Патент РФ № 62236 (МПК⁸ G 01 K 7/02). Чувствительный элемент / Вигдорович В.Н., Каримбеков М.А. Матюнин В.М., Опаричев А.Б., Опаричев Е.Б. Заявлен: 13 ноября 2006 г. Опубликовано: Бюллетень «Изобретения и полезные модели». № 9, 2007.

31. Опаричев Е.Б., Каримбеков М.А. Топология и конструкция пленочных анизотропных термоэлектрических преобразователей различного назначения. – В кн.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Девятнадцатая Международная конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов: В 4-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. Т. 4. С.211.

32. Марченков А.Б., Матюнин В.М., Опаричев Е.Б., Проходцов М.А. Исследование микро- и макротвердости материалов и влияния на них скорости индентирования // Технология металлов. – 2013. №2. С.54-56.