

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу *Шелудько Владимира Евгеньевича* “ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОЛСТЫХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ Ni_3B , BaB_6-LaB_6 И SnO_2-Sb ”, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение

Диссертационная работа Шелудько В.Е. посвящена исследованию и совершенствованию процессов неразрушающего и разрушающего воздействия лазерного излучения на структурно-фазовые превращения и электрофизические свойства толстых плёнок на основе Ni_3B , BaB_6-LaB_6 и их твёрдых растворов, а также легированного сурьмой диоксида олова. Выбор исследуемых материалов обусловлен их широким применением в производстве резистивных пленочных элементов, в том числе тензометрических датчиков.

Лазерная технология занимает важное место в области модификации покрытий и материалов, создания новых структур, интенсификации фотохимических процессов, а также для изготовления элементов на их основе. Значительного применения лазерная обработка достигла в микроэлектронике. В настоящее время всё больше используется возможность избирательного действия лазерного луча на характеристики твёрдого тела, на структурно-фазовые превращения, диффузионные процессы и др. Исследования, которые провёл диссертант, по модификации сложных многокомпонентных гетерогенных толстоплёночных структур путём лазерного облучения в разных режимах без разрушения поверхностного слоя, актуальны как в теоретическом, так и практическом аспектах для современного материаловедения и микроэлектроники.

Диссертационная работа состоит из вступления, четырёх разделов основного текста, выводов, списка использованных литературных источников и двух приложений.

Во вступлении автор обосновал актуальность проведённых исследований, сформулировал цели и задачи, научную новизну и практическое значение. Также приведены данные о публикациях и апробациях результатов работы на конференциях и семинарах. Показана связь проведенных исследований с научной тематикой Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.

В первом разделе приведен детальный обзор известных публикаций по созданию и исследованиях разнообразных классов композиционных толстых плёнок, которые применяются на практике или находятся в стадии разработки. Сделан вывод о зависимости параметров толстоплёночных резисторов от дисперсности исходных порошков проводящей фазы, от взаимодействия между компонентами пасты и подложки, природы стеклосвязующего, температурного режима обработки. Автор обратил внимание на то, что вопросы структурно-фазовых превращений, изменения морфологии поверхности и концентрационного распределения элементов в результате лазерного воздействия без разрушения поверхностного слоя практически не изучены, хотя известно, что протекание кинетических и диффузионных процессов при лазерной обработке значительно отличается от обычного изотермического нагревания. Критический подход к опубликованным материалам позволил сформулировать основные задачи исследования и выбрать объекты, отличающиеся типом проводимости: от металлической до полупроводниковой.

Во втором разделе охарактеризованы компоненты для изготовления толстых плёнок, технологические аспекты приготовления паст, применяемые методы исследования фазового состава, структуры, электрофизических свойств, методики измерения и расчёта теплофизических и оптических характеристик, режимы лазерной обработки.

В третьем разделе автор впервые на конкретных примерах привёл расчёты коэффициентов теплопроводности изученных многокомпонентных систем, оптических характеристик, которые позволили применить их в расчётах тепловых полей в толстых плёнках при лазерной обработке (значения температур на поверхности и по толщине плёнки, скоростей нагревания и охлаждения).

В четвёртом разделе обобщены результаты влияния лазерного облучения импульсами разной энергии и длительности на структуру и свойства толстых плёнок. На примере толстоплёночных резисторов на основе Ni_3V показано, что, изменяя интенсивность лазерного облучения и условия облучения, можно достичь образования однородной ванны расплава с минимальным количеством термокапиллярных волн, что снижает шероховатость поверхности на $\sim 30\%$. Это обстоятельство представляет интерес при создании регулируемых резисторов. Путём анализа изображений, полученных на атомно-силовом микроскопе (АСМ), убедительно показано, как после

лазерной обработки зернистая структура исходного образца трансформируется в оплавленную поверхность. Важным является установление своеобразного перколяционного энергетического порога, при котором, происходит уменьшение концентрации никеля в проводящей фазе и резко возрастает сопротивление. Автор впервые применил исследование поверхности образцов на наноуровне, используя данные изображения “фазового контраста”, полученные на АСМ. Предложенная методика может оказаться полезной для оценки величины диэлектрической прослойки между частицами проводящей фазы, что является важным фактором для определения типа проводимости в толстых плёнках. Заслуживает внимания дифференциальный метод, который автор впервые применил для анализа вольтамперных характеристик (ВАХ). Используя зависимость параметра $\alpha(U)$, можно определить значения напряжений, при которых происходит переход от сублинейной до сверхлинейной зависимости $\alpha(U)$ в области оптимальной работы резистора. Для толстых плёнок на основе гексаборида бария и твёрдого раствора BaB_6-LaB_6 установлен важный факт существования некоторого энергетического режима облучения, при котором обеспечивается адгезионная связь на межфазной границе “плёнка-подложка” за счёт взаимного массопереноса проводящей фазы и алюминия из подложки. Этот же режим для плёнок на основе LaB_6 позволяет обеспечить равномерное распределение лантана, как по толщине, так и в направлении сканирования луча по поверхности подложки. Интересный факт был установлен при облучении толстых плёнок импульсами наносекундной длительности. Лазерная обработка в таком диапазоне интенсивности излучения (до 5 ТВт/м^2) вследствие взрывообразного испарения и формирования ударной волны приводит к образованию мелкодисперсной структуры, как на поверхности, так и по толщине плёнки, причем кратковременность мощного теплового воздействия не приводит к значительному изменению фазового состава, за исключением появления на поверхности окисных фаз или металлического никеля, однако, структурная устойчивость толстых плёнок к многократному воздействию импульсов наносекундной длительности позволяет использовать такой характер облучения для тонкой корректировки номиналов резисторов и повышения тензочувствительности датчиков на пленочной основе.

Исследование ВАХ и зависимостей $R(T)$ показало, что они линейны с сохранением положительного знака температурного коэффициента сопротивления. В

полупроводниковых толстых плёнках на основе легированного сурьмой диоксида олова оптимальная работа ($\alpha = 1$) реализуется после лазерной обработки импульсами нано- и микросекундного диапазона. Характерно, что при таком воздействии первоначальная нелинейная зависимость ВАХ изменяется на линейную. Кроме того, обработка чувствительных элементов тензодатчиков на основе легированного сурьмой диоксида олова импульсами наносекундной длительности повышает коэффициент тензочувствительности на $\sim 35\%$.

Приведенные в диссертации экспериментальные данные характеризуют избирательность действия лазерного излучения и подтверждают возможность эффективного управления структурой и свойствами толстых плёнок, изменяя режимы лазерной обработки.

Обобщение результатов исследования приведено в разделе “Выводы”, причем принятая форма их изложения точно выражает достижения автора, основные положения которых достаточно аргументированы и подтверждены фактическим материалом предыдущих разделов диссертационной работы. Из них, в частности, следует, что полученные результаты могут быть использованы в производстве толсто пленочных элементов из новых, более доступных и дешевых материалов, и это не снижает их качества вследствие целенаправленного формирования эксплуатационных характеристик за счет умелого использования лазерной технологии, в частности, для повышения коэффициента тензочувствительности датчиков и при изготовлении переменных толсто пленочных резисторов и микрополосковых линий в СВЧ-микросхемах.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании современных эффективных физических методов исследования, компьютерного моделирования, а содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в публикациях автора в специализированных научных изданиях.

Однако, по моему мнению, в диссертационной работе есть некоторые упущения, которые можно выразить в виде замечаний:

1. Возможности лазерной технологии в процессах формирования толсто пленочных структур и их результаты могли бы быть удивительнее, если бы автор применил в исследованиях более широкий класс лазеров (глава 2), как в отношении частотных, так и временных характеристик их излучения. Это позволило бы изучить и

использовать влияние характера поглощения излучения материалом пленок (объемного или поверхностного) на количественные и качественные показатели операции облучения и расширить режимные возможности управления последней.

2. Привлекая широкий перечень явлений, ответственных за достижение положительных результатов (теплофизических, термодинамических, механических), автором не в достаточной мере использованы режимные возможности лазерной технологии, в частности, для управления режимом облучения возможно варьирование интенсивности в зоне обработки не только изменением уровня импульсной энергии излучения, а и за счет воздействия на пространственные и временные его параметры:
 - применением фемтосекундных импульсов для более избирательного и локального воздействия на компоненты пленки;
 - управления режимом подачи энергии (гиперимпульсный и непрерывный) в случае необходимости улучшения качества поверхности пленки при стабилизации её толщины;
 - воздействия на поперечное распределение мощности излучения в луче для управления пространственной формой изотерм в пленке.
3. Для выбранной методики определения теплофизических свойств композиционных материалов пленки (в частности по методу В. И. Оделевского), а также её оптических свойств, которые зависят как от состава и структуры, так и шероховатости поверхности пленки, необходима специальная методика определения температурных зависимостей этих характеристик (вплоть до жидкого состояния), без которых невозможно получение адекватных решений тепловых задач тем или иным способом. В работе (глава 3) я не нашел методики получения этих зависимостей и схему (стенд) её реализации или ссылку на использованные известные решения.
4. В работе не проводились исследования лазерного облучения толсто пленочных объектов в контролируемых атмосферах, что, по моему мнению, дало бы возможность использовать дополнительные эффекты воздействия на пленки и разнообразить последствия (структурные, размерные и качественные) применения лазерной обработки.

5. Автором в ряде случаев недостаточно однозначно определены (или представлены) режимы лазерного облучения, в том числе их граничные значения. Так, при определении условий формирования адгезионной связи на межфазной границе “плёнка-подложка” указана лишь энергетическая составляющая режима облучения ($E = 0,4$ Дж), что в отсутствие размеров поперечного сечения зоны облучения и продолжительности процедуры (длительности лазерного импульса) не дает возможности практически использовать полученную рекомендацию. То же касается и рекомендаций по снижению шероховатости пленок в результате лазерного импульсного облучения с энергией 0,3-0,4 Дж. Также в ряде случаев режим рекомендованного сканирования описывается лишь его скоростью без учета частоты подачи импульсов, что не позволяет установить реальную картину схемы облучения – по величине её коэффициента перекрытия. Этих недостатков работы можно было избежать, если бы качественные характеристики процедуры облучения связывать с плотностью мощности теплового источника, образованного на поверхности или в объеме зоны обработки вследствие лазерного облучения, а количественные – с удельной его тепловой энергией.
6. При определении режимов облучения в случаях размерного удаления (испарения) материала пленки в операциях подгонки резисторов не удастся ограничиться решением уравнения теплопроводности любым известным способом, так как на его точность влияет существенный (для выбранного диапазона длительности облучения) массоперенос, особенно, в виде расплава и твердой фракции, поэтому единственным и эффективным путем являются экспериментальные методы режимного обеспечения по соответствующей методике (например, “черного ящика”), включающей этап оптимизации режимов обработки в многокритериальной постановке.

Однако эти замечания не имеют решающего значения в общей оценке работы и не снижают положительного впечатления от впервые полученных в ней полезных, интересных и оригинальных результатов, а по желанию автора они могут определить цель и задачу дальнейших исследований в выбранной им области научного творчества.

Замечаний к оформлению диссертации, её текстовой и графической частям нет. В опубликованных соискателем трудах, выступлениях на конференциях полностью изложены основные положения и методики, поставленные задачи и полученные

результаты. Содержание автореферата в полной мере дает представление о выполненных исследованиях и полученных результатах.

Данная диссертационная работа является завершённым исследованием, в котором получены научные результаты, имеющие фундаментальное и прикладное значение. Они позволяют расширить представления о структурно-фазовых превращениях при лазерной обработке, о возможности управления этими процессами для достижения оптимальных рабочих характеристик изделий, а также о реальной их практической пользе.

Представленная диссертационная работа по актуальности, полученным фундаментальным и практическим результатам, уровнем обоснованности выводов и рекомендаций полностью отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям («Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань»), а её автор, Шелудько Владимир Евгеньевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение.

Доктор технических наук, профессор
кафедры лазерной техники и физико-
технических технологий механико-
машиностроительного института НТУУ «КПИ»

Котляров

Подпись В. П. Котлярова удостоверяю

“ 18 ” августа 2015

Проректор



О.М. Флорков