

## ОТЗЫВ

научного руководителя о кандидатской диссертации

Воронина Антона Сергеевича

### «ФОРМИРОВАНИЕ СЕРЕБРЯНЫХ МИКРОСЕТЧАТЫХ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ САМООРГАНИЗОВАННЫХ ШАБЛОНОВ И КОМПОЗИТЫ НА ИХ ОСНОВЕ»,

представленной к защите по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация А.С. Воронина посвящена разработке способа получения микросетчатых прозрачных проводящих покрытий при помощи шаблонов, формируемых в рамках процессов самоорганизации, и исследованию их свойств, получению и исследованию композиционных покрытий с квазисплошной структурой на основе серебряных микросетчатых структур и углеродных наноматериалов. Наиболее существенные результаты диссертации:

1. Впервые продемонстрирована возможность использования растресканных пленок кремнезёма в качестве шаблонных структур для формирования микросетчатых прозрачных проводящих покрытий в рамках подхода «bottom-up».
2. Установлена возможность управления морфологией растрескивания пленок кремнезёма посредством вариации рН и толщины жидкой пленки золя. Показано существенное влияние модификации золь глицирином на морфологию растресканных пленок кремнезёма. Рассмотренные факторы управления параметрами растресканных пленок кремнезёма позволили в широком диапазоне варьировать средний размер ячейки (от  $40,1 \pm 17,9$  мкм до  $164,2 \pm 68,1$  мкм) и ширину трещины (от  $0,8 \pm 0,2$  мкм до  $18,8 \pm 5,1$  мкм), что позволяет изменять долю площади, занимаемой сеткой трещин, от  $3,5 \pm 1,2$  % до  $29,7 \pm 9,1$  %.
3. Серебряные микросетчатые прозрачные проводящие покрытия, полученные при помощи самоорганизованных шаблонов имеют малое поверхностное сопротивление и высокую прозрачность: шаблон С –  $13,2$  Ом/□, 88,4 %,  $\sigma_{dc}/\sigma_{opt} = 230$  (100 нм Ag); шаблон С –  $4,1$  Ом/□, 85,7%,  $\sigma_{dc}/\sigma_{opt} = 550$  (300 нм Ag); шаблон А –  $1,3$  Ом/□, 77,3 %,  $\sigma_{dc}/\sigma_{opt} = 1050$  (300 нм Ag); шаблон F –  $54,2$  Ом/□, 95,8 %,  $\sigma_{dc}/\sigma_{opt} = 60$  (210 нм Ag).

Покрyтия обладают высокой устойчивостью к механическим и термическим воздействиям, сохраняя функциональность при малой величине радиуса изгиба (5 мм) и высоких температурах нагрева (> 200 °С). Показана их функциональность в качестве прозрачных ИК-нагревателей и антиобледенительных покрытий на различных подложках.

4. Продемонстрирована возможность получения квазисплошных композиционных покрытий одностенные углеродные нанотрубки/серебряная микросетка, покрытия имеют поверхностное сопротивление 8,8 Ом/□ (шаблон E) и 52,1 Ом/□ (шаблон F) и прозрачность 82,7% и 91,8% соответственно. Суперпозиция сетчатых структур позволяет формировать композиционные покрытия с однородным распределением проводящей фазы по подложке, что является важнейшим критерием, определяющим перспективы микросетчатых покрытий в оптоэлектронике.

5. Получены композиционные покрытия типа «ядро-оболочка», посредством гальванического наращивания меди на серебряные микросетчатые затравки. Формирование медной оболочки позволяет существенно уменьшать поверхностное сопротивление композиционных покрытий относительно микросетчатых затравок, с 22,4 Ом/□ до 0,5 Ом/□ в случае затравки на основе шаблона E (время осаждения меди 8 сек) и со 135,6 Ом/□ до 0,7 Ом/□ в случае затравки на основе шаблона F (время осаждения меди 40 сек). Композиционное покрытие, полученное при помощи шаблона F, характеризуется поверхностным сопротивлением 0,7 Ом/□ при прозрачности 92,8%, что является на настоящий момент рекордным сочетанием параметров, для различных типов прозрачных проводящих покрытий.

6. Получены коррозионностойкие композиционные покрытия восстановленный оксид графена/серебряная микросетка. Тонкая пленка восстановленного оксида графена конформно покрывает серебряную микросетку, ингибируя коррозионные процессы в агрессивных средах. Покрытия характеризуются стабильностью по отношению к процессам химической (4% р-р Na<sub>2</sub>S) и электрохимической коррозии.

Продемонстрирована функциональность композиционных покрытий в качестве стабильных прозрачных электродов в электрохромной сэндвич-структуре на основе виологена.

Во время обучения в аспирантуре А.С. Воронин продемонстрировал навыки самостоятельной исследовательской работы принимал участие в ряде

всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 5 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено 2 патента.

Автореферат полностью отражает диссертацию.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям согласно п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842. Считаю, что Воронин Антон Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы.

Научный руководитель

Д-р физ.-мат. наук, профессор

Почетный работник науки и техники РФ

01.02.2017 г

А.И. Лямкин

Лямкин Алексей Иванович,  
660074, г. Красноярск-74, ул. академика Киренского, 28, Институт инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»  
заведующий кафедрой «Физика»  
сл. тел. +7(391)249-82-72, E-mail: doca@bk.ru

