

УДК 538.911

АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Александр Евгеньевич Шупенев⁽¹⁾, Юрий Михайлович Миронов⁽²⁾

*Магистрант 1 года⁽¹⁾, аспирант⁽²⁾,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.И. Мисюров,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Современные тенденции миниатюризации в электронике и технике приводят к необходимости поиска новых способов обеспечения эффективного теплоотвода нагреваемых элементов конструкции, выдвигая все более жесткие технологические ограничения для конструкций теплообменников. Открытый в 1834 году эффект Пельтье, заключающийся в выделении или поглощении тепла при прохождении электрического тока в месте контакта (спая) двух разнородных проводников позволил создать термоэлектрические модули, применяемые в настоящее время во многих областях техники и электроники. Термоэлектрические модули на основе эффекта Пельтье обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными устройствами теплоотвода: отсутствие подвижных частей, возможность миниатюризации, возможность охлаждения до сверхнизких температур и другие. Однако встает вопрос о повышении термоэлектрической эффективности работы данных модулей.

Полупроводниковые материалы на основе теллурида висмута Bi_2Te_3 широко используются в термоэлектрических преобразователях энергии, холодильниках, термостатах благодаря высоким значениям термоэлектрической эффективности [1]. В современных твердотельных термоэлектрических преобразователях энергии используются преимущественно объемные материалы. Интерес к тонким и сверхтонким пленкам указанных полупроводников обусловлен перспективами создания миниатюрных устройств с более высокими функциональными возможностями. Локальное охлаждение или нагревание происходит приблизительно в $2 \cdot 10^4$ раз быстрее, чем в устройствах, созданных на основе объемных материалов [2]. Получение тонких пленок Bi_2Te_3 традиционным методом термического испарения в вакууме наталкивается на трудности, связанные с высоким парциальным давлением паров халькогена. Из-за потери легколетучего компонента вследствие реиспарения атомов халькогена с поверхности растущей пленки при относительно высоких температурах ($T \geq 300^\circ\text{C}$) пленки имеют худшие электрические параметры по сравнению с монокристаллами. При более низких температурах роста пленки имеют, как правило, поликристаллическую структуру [2].

Метод импульсного лазерного осаждения выгодно отличается от термических методов непрерывного осаждения тонких пленок полупроводников. Наличие большой доли возбужденных атомов и ионов позволяет понизить температуру эпитаксиального роста, а высокая скорость образования зародышей позволяет осаждать чрезвычайно тонкие сплошные пленки (единицы нанометров). Кроме того, поскольку за один

импульс испаряется незначительная масса вещества мишени, можно достаточно точно контролировать толщину пленки количеством лазерных импульсов. Качество полученных методом лазерной абляции пленок сопоставимо с качеством пленок, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [2].

По сравнению с магнетронным и электронно-лучевым способами метод лазерного импульсного испарения имеет в несколько раз меньшую производительность, что объясняется низкой средней скоростью из-за большой скважности импульсов. Увеличить же производительность можно путем увеличения площади испарения при сохранении плотности мощности излучения, а также увеличением частоты излучения. В то же время преимущества, присущие лазерному методу испарения: сохранение стехиометрического состава испаряемого вещества при переносе его на подложку, высокие импульсные скорости осаждения при возможности регулирования в широком диапазоне энергии частиц пара – дают широкие возможности для использования данного метода при формировании наноразмерных тонкопленочных покрытий.

Принцип работы оборудования для импульсного лазерного осаждения заключается в следующем. Лазерный луч попадает в вакуумную камеру через кварцевое окно и воздействует на мишень из осаждаемого материала. Взаимодействие высокоэнергетического лазерного импульса с материалом мишени приводит к образованию целого ряда продуктов, среди которых присутствуют не только электроны, ионы и нейтральные частицы, но и твердые микрочастицы материала мишени, отрывающиеся при взрывообразном испарении материала. Образованная плазма распространяется нормально к поверхности мишени и достигает керамической подложки, осаждаясь в виде тонкой пленки испаренного материала. Для равномерности испарения и осаждения, подложке и мишени придаются вращательные движения, а также производится нагрев подложки.

В МГТУ им Н. Э. Баумана ведутся работы по получению тонких термоэлектрических пленок методом импульсного лазерного осаждения. Источником лазерного излучения служит эксимерный Kr-Флазер с длиной волны лазерного излучения 248 нм, максимальной энергией до 400 мДж, длительностью импульса 30нс, частотой следования импульсов до 10 Гц. В качестве мишеней использовались таблетки из прессованного порошка теллурида висмута. Эксперименты проводились в высоком вакууме (10^{-8} торр), при различных энергетиках лазерного излучения, при различных температурах подложки.

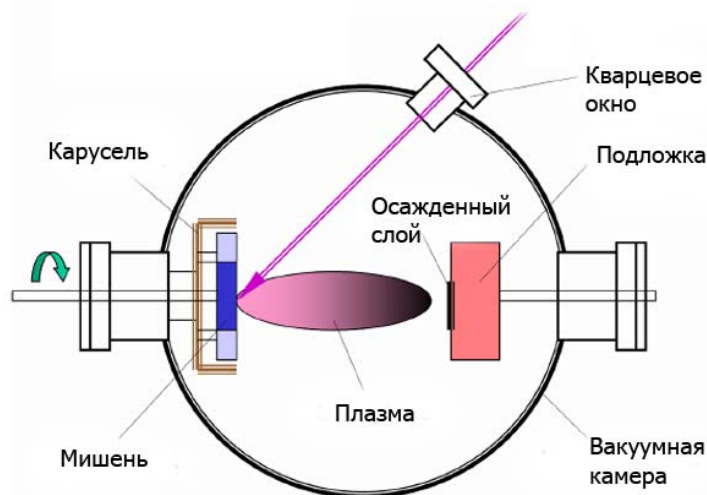


Рис. 1. Схема оборудования для импульсного лазерного паро-фазного осаждения



Рис. 2. Платформа Нанофаб-100, модуль импульсного лазерного осаждения

Морфологические исследования поверхности осажденных пленок Bi_2Te_3 проводились на сверхвысоковакуумном модуле с колонной фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП). Особенности состояния поверхностного слоя осажденных пленок, безусловно, зависят от толщины осажденного материала [1]. Поэтому начальными измерениями служили измерения толщины осаждения слоя при различных температурно-энергетических параметрах процесса осаждения.



Рис. 3. Платформа Нанофаб-100, модуль СВВ ФИП

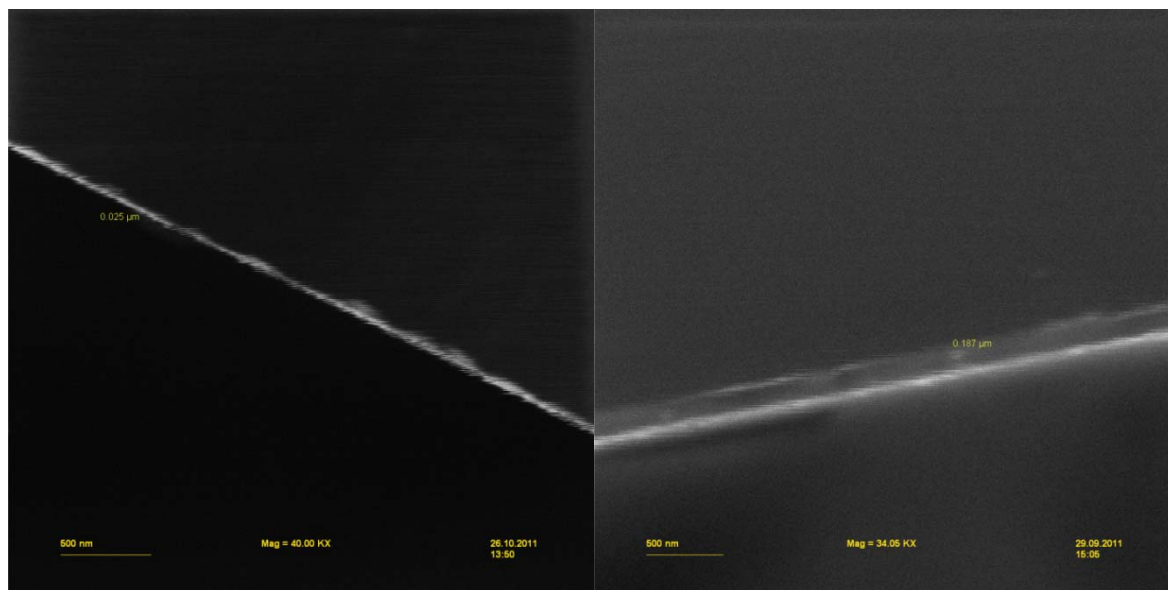


Рис. 4а. Толщина пленки Bi_2Te_3 осажденной при расстоянии $H=15\text{ мм}$, температуре нагревателя $T=20^\circ\text{C}$ (справа, $\times 4000$), $T=400^\circ\text{C}$ (слева, $\times 4000$)

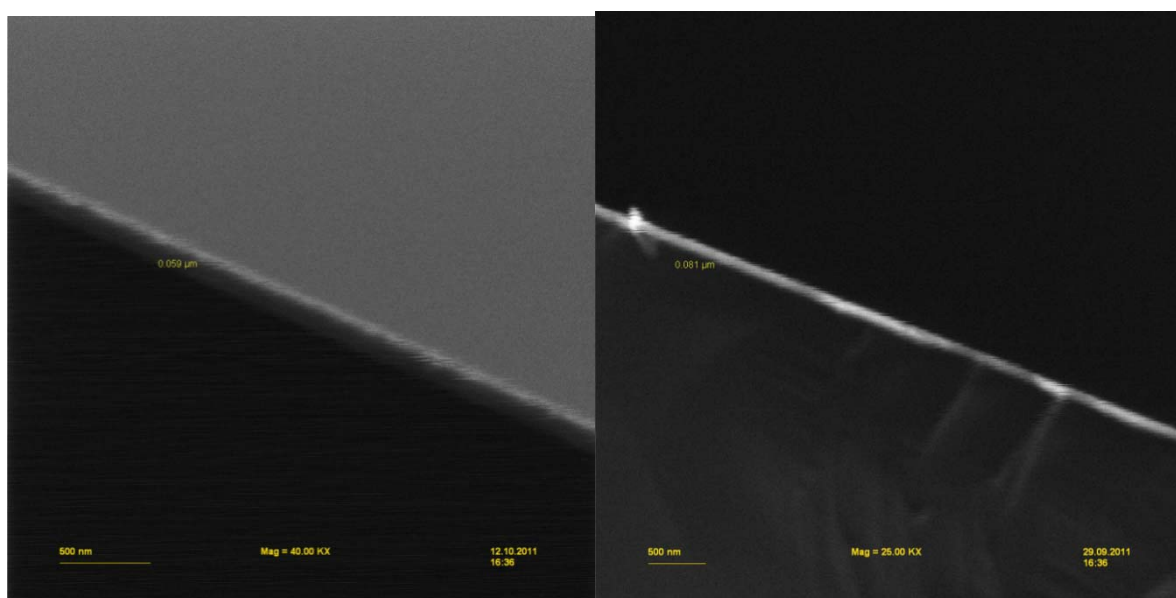


Рис. 4б. Толщина пленки Bi_2Te_3 осажденной при расстоянии $H=50\text{ мм}$, температуре нагревателя $T=20^\circ\text{C}$ (справа, $\times 4000$), $T=400^\circ\text{C}$ (слева, $\times 2500$)

Измерения толщины осажденного слоя проводились в оптическом и электронно-оптическом режиме в торец свежего скола. Скол производился перпендикулярно поверхности осажденного слоя приблизительно посередине полученного образца. На каждый образец производилось определенное количество измерений, в результате чего подсчитывалось среднее значение. Приведены примеры измерений.

По полученным данным построена зависимость толщины осажденного слоя от температуры нагревателя при постоянной энергетике лазерного излучения на различных расстояниях мишени от подложки. Зависимость имеет экстремальный характер с пиком для обоих случаев положения подложки в области температуры нагревателя 400°C . Дальнейшее уменьшение толщины осаждаемого слоя, возможно, объясняется усилением эффекта термического испарения атомов теллурида висмута с нагретой подложки.

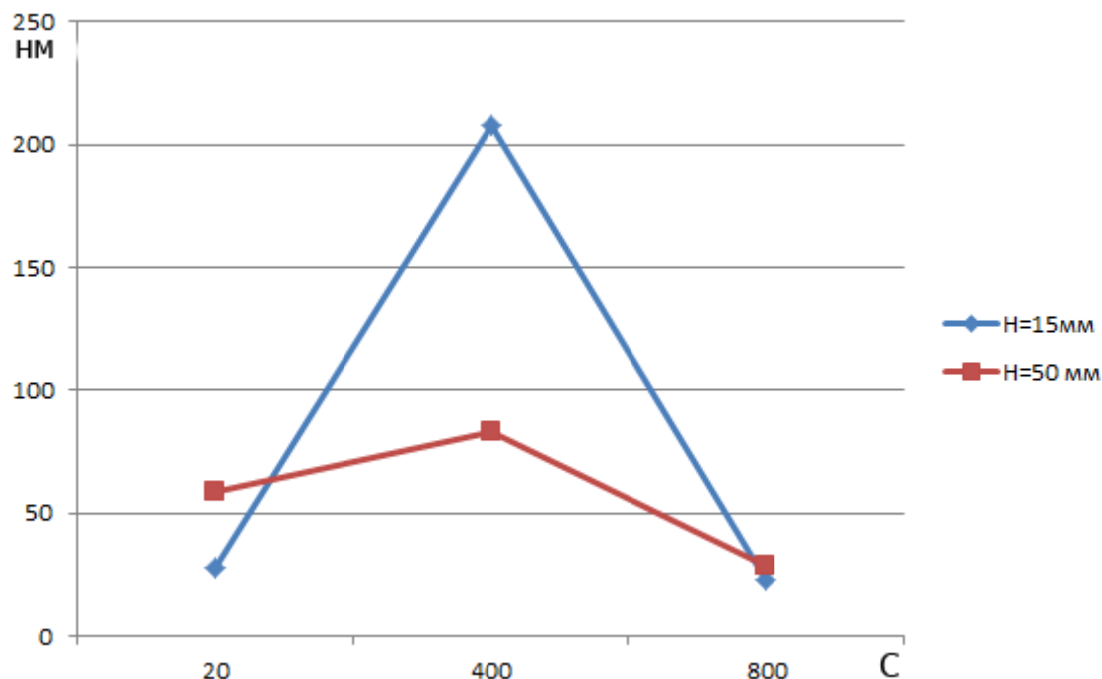


Рис. 5. Зависимость толщины осажденного слоя Bi_2Te_3 от температуры нагревателя

Морфологические исследования состояния поверхности осажденных пленок Bi_2Te_3 проводились также на сверхвысоковакуумном модуле с колонной фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП).

Представлен внешний вид поверхности пленок осажденных при различных температурах. Температура нагревателя варьировалась в пределах от 20 до 800 градусов Цельсия. Стрелками отмечены участки с нарушенным стехиометрическим составом. Отмечается уменьшение частоты образования дефектных участков с увеличением расстояния между подложкой и мишенью.

Для изучения нанорельефа поверхности тонких пленок использовались сверхвысоковакуумный сканирующий зондовый микроскоп JEOL JSPM 4610 и зондовый микроскоп NtegraSpectra. Анализ проводился для различных расстояний между мишенью и подложкой. Сканировался участок поверхности образца $5 \times 5\text{ мкм}$ зондовым методом, в результате чего фиксировалась величина шероховатости. Средние значения шероховатости пленок составляют порядка 2 нм при толщине осажденного слоя 100 нм. Отмечается снижение шероховатости поверхностного слоя осажденного слоя с увеличением расстояния между мишенью и подложкой. Так, расстояния $H=15\text{ мм}$ соответствует средняя шероховатость 2 нм, а расстоянию $H=50\text{ мм}$ соответствует значение средней шероховатости 18 нм. Возможным объяснением данного эффекта является уменьшение средней энергии осаждаемых на подложку частиц теллурида висмута с увеличением пути пролета осаждаемых частиц, вследствие чего снижается количество и размеры образуемых ими кластеров.

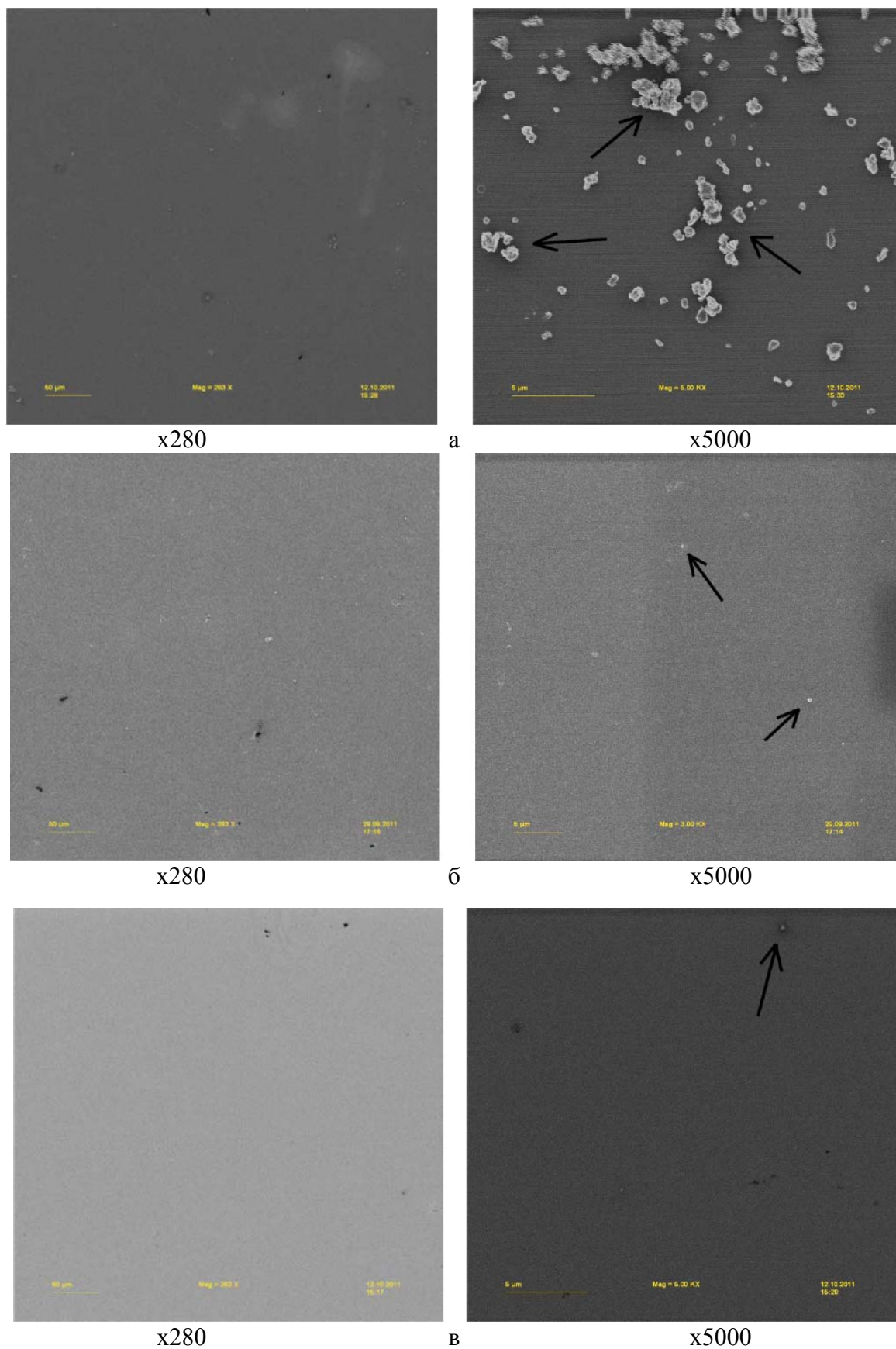


Рис. 6. Поверхность пленки Bi_2Te_3 осажденной при различных температурах нагревателя:
а — $T=20^\circ\text{C}$; б — $T=400^\circ\text{C}$; в — $T=800^\circ\text{C}$

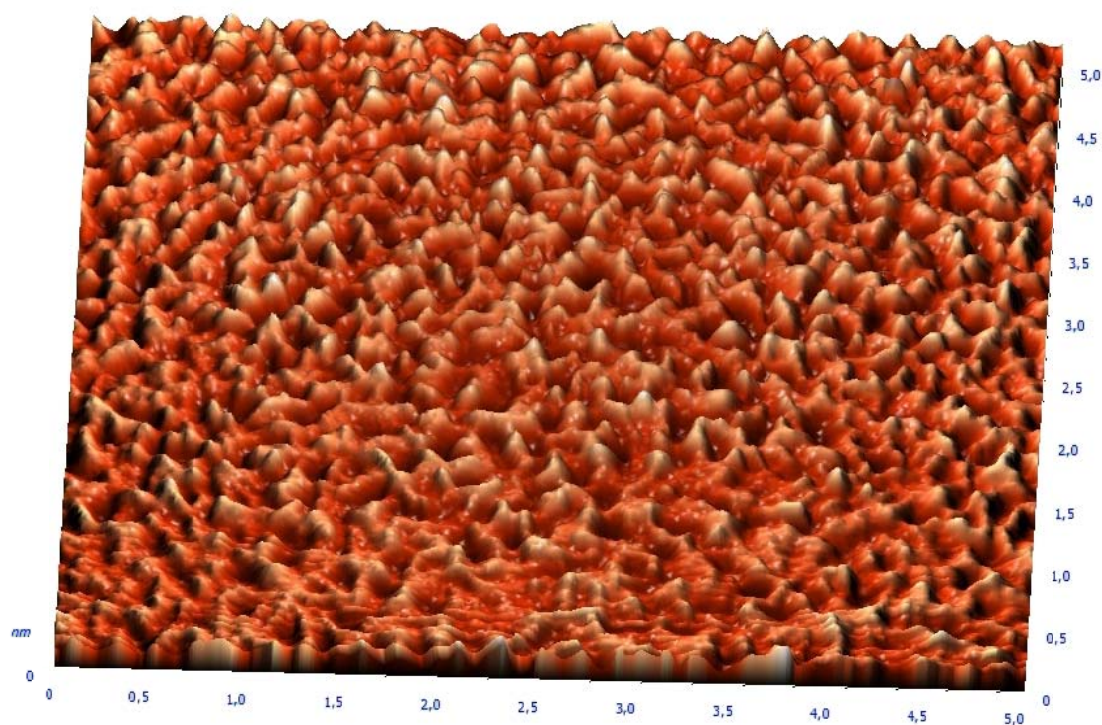


Рис. 7. Поверхность пленки Bi_2Te_3 осажденной при температуре нагревателя $T=400^\circ\text{C}$, расстоянием между мишенью и подложкой $H=15\text{мм}$

Литература:

1. Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов, Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М.: Наука, 1972.
2. И.С. Вирт [и др] Физика и техника полупроводников /Осаждение тонких пленок Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 методом импульсной лазерной абляции/, 2010. т.44.