

Механизм формирования эпитаксиальных пленок и слоев теллура с высоким структурным совершенством, получаемых термовакuumным напылением в среде водорода

М. Р. Рабаданов, И. М. Шапиев, А. О. Кузьмин, А. М. Исмаилов

Представлены результаты получения эпитаксиальных пленок теллура на подложках из слюды (мусковит) методом термического испарения Te в среде водорода. Образование молекул H_2Te в зоне тигля, их диффузия в зону подложки и термализация с ростовой поверхностью за счёт высокой теплопроводности водорода, диссоциативная адсорбция H_2Te на поверхности с последующей десорбцией H_2 и накоплением атомарного теллура (Te) являются ключевыми особенностями процесса кристаллизации пленки на всех ее стадиях. Атомарный теллур способствует зарождению и росту жидкокапельных ориентированных зародышей при температурах подложки близких к температуре плавления теллура ($450^\circ C$). На стадии коалесценции жидкофазных островков формируется «мозаика» островковой фазы, состоящая из пустот разных размеров, ограниченных кристаллографическими гранями. После формирования сплошной пленки начинается стадия автоэпитаксиального роста пленки, также реализуемая по островковому механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК-механизм). По структурному совершенству, полученные пленки и слои Te превосходят объемные монокристаллы и могут найти применение для изготовления приборных структур в области микро-, опто-, акустоэлектроники.

Ключевые слова: теллур, эпитаксиальные пленки, термовакuumное напыление, совершенство структуры, морфология поверхности, ПЖК-механизм.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-50-56

Введение

Теллур (Te) представляет собой элементарный полупроводник p -типа с узкой прямой запрещенной зоной (0,35 эВ при комнатной

температуре). Его кристаллическая структура состоит из спиральных цепочек атомов Te, уложенных вместе в гексагональную решетку [1]. Каждый атом Te ковалентно связан со своими двумя ближайшими соседями в пределах цепочки, а между соседними цепочками действуют силы Ван-дер-Ваальса, а также силы металлического характера. Такая особенность структуры обуславливает уникальный набор его физико-химических свойств: пьезоэлектрических, фотоэлектрических, нелинейных оптических, термоэлектрических, каталитических и др.

В последние десятилетия во всем мире интенсивно проводятся работы по синтезу и исследованию уникальных свойств низкоразмерных структур теллура (нитевидные кристаллы (НК), нанотрубки, наноленты, квантовые точки и т. д.) [2–4]. Считается, что

Рабаданов Муртузали Рабаданович¹, ст. преподаватель.

Шапиев Ибрагим Магомедович¹, ст. преподаватель.

Кузьмин Андрей Олегович², с.н.с., доцент.

E-mail: kuzmin@catalysis.ru

Исмаилов Абубакар Магомедович¹, доцент.

E-mail: egdada@mail.ru

¹ Дагестанский государственный университет.

Россия, 367000, Р. Дагестан, г. Махачкала, ул. Гаджиева 43-А.

² Институт катализа СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 5.

Статья поступила в редакцию 06 ноября 2020 г.

высокоанизотропная кристаллическая структура теллура способствует росту одномерных наноструктур вдоль направления [0001], получаемых различными методами. В ряде публикаций описываются попытки создания приборных структур с использованием как массива НК, так и отдельного НК (газовые сенсоры, полевые транзисторы, термоэлектрические и пьезоэлектрические устройства и др.) [2]. Интерес к теллуру еще больше возрос, когда в 2017 году теоретически было предсказано существование теллурена – новейшего представителя семейства 2D-материалов [5]. Расчеты показали, что теллур потенциально может иметь три аллотропные структуры при образовании 2D кристаллов (α -Te, β -Te, γ -Te). В настоящее время продолжается активное теоретическое и экспериментальное исследование теллурена [6, 7], продемонстрированы его преимущества при изготовлении приборных структур с улучшенными характеристиками [8, 9].

Несмотря на достигнутые успехи в получении одномерных и двумерных наноструктур теллура, не решенными до сих пор остаются вопросы по технологии получения теллура в классической форме – в виде тонких пленок и слоев. Первые тонкие пленки теллура были получены методом термического вакуумного напыления, данный метод используется и по настоящее время [10–14]. Масс-спектрометрические исследования показали, что паровая фаза над твердым и жидким теллуrom, в основном (более 95 вес. %), состоит из двухатомных молекул Te_2 (соединения Te_3 – Te_7 все вместе составляют менее 5 вес. %) [15]. Практически полное отсутствие в паровой фазе атомарного теллура является основным препятствием на пути получения его пленок с высоким структурным совершенством. Подвижность двухатомных молекул теллура Te_2 на ростовой поверхности низка при температурах подложки $T < 300$ °C, а при более высокой температуре конденсация Te_2 отсутствует из-за трудности зародышеобразования при низкой разнице в температурах подложки и пара теллура [10–13]. Были предложены различные модификации термовакуумного напыления теллура: ионизация пара электронным лучом [16], метод горячей стенки [11], частотное термическое испарение в вакууме [17]. Однако эти меры проблему по-

лучения высокосовершенных пленок Te так и не решили.

Нами предложена [18] и изучается новая технология получения эпитаксиальных пленок и слоев теллура с высоким структурным совершенством, основанная на добавлении водорода в качестве среды для проведения процесса. Настоящая работа посвящена исследованию механизма их формирования.

Эксперимент

Основу кристаллизационного реактора составляют плита и цилиндрический колпак объемом 2 литра. Блок-схема установки представлена на рис. 1. Для вакуумно-плотного соединения колпака с плитой используется прокладка из витона. Реактор откачивается до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па. Создаются две температурные зоны с помощью резистивного нагрева: зона тигля (зона формирования парогазовой смеси) с температурой T_2 и зона подложки (зона осаждения) с температурой T_1 . Температура в зонах тигля и подложки регулируется с помощью программного регулятора температуры Термодат-19ЕЗ (ООО НПП «Системы контроля», Россия). Необходимое давление водорода в реакторе обеспечивается изменением давления газа на выходе генератора водорода и игольчатым клапаном ротаметра и контролируется по показаниям манометра. Тигель представляет собой стакан из тонкостенного кварца, в который насыпают теллур полупроводниковой чистоты 99,999 % (5N PlusInc, Канада). В качестве подложек использовались свежие сколы слюды (мусковит).

Исследования микроморфологии поверхности образцов проводились на растровом электронном микроскопе SEM Leo-1450 (Carl Zeiss, Германия) в режиме вторичных электронов. Рентгеновские исследования выполнялись на дифрактометре Empyrean Series 2 (PANalytical, Нидерланды) с использованием $CuK\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,15406$ нм). Спектры снимались в диапазоне углов $2\theta = 10$ – 90° в режиме непрерывного сканирования с шагом $0,01^\circ$ и со скоростью $0,5^\circ/\text{мин}$.

Контролируемыми технологическими параметрами процесса кристаллизации являются: температура зоны тигля T_2 и подложки

T_1 , величина перепада между этими зонами $\Delta T = T_2 - T_1$, давление водорода P в системе. В данной работе приведены результаты исследования пленок и слоев Te, получаемых при следующих условиях: $T_2 = 600$ °С, $T_1 = 430$ °С, $\Delta T = 170$ °С, $P = 1,2$ атм. (абс.).

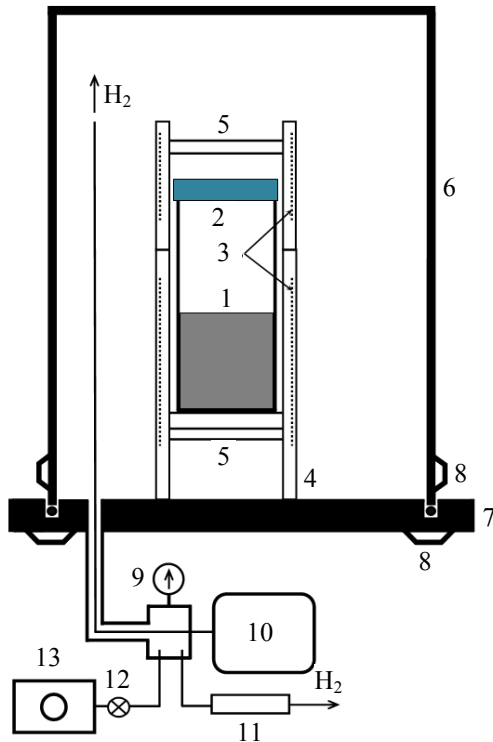
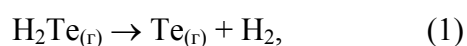


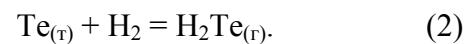
Рис. 1. Блок-схема установки для получения пленок и слоев теллура. 1 – порошок теллура; 2 – подложка; 3 – нагреватель (нихром); 4 – кварцевая труба; 5 – тепловые экраны; 6 – колпак; 7 – плита; 8 – канавки водяного охлаждения; 9 – манометр цифровой ДМ5002Г (ОАО «Манотомь», Россия); 10 – генератор водорода H₂-CARR-500 (Lni Schmidlin Sa, Швеция); 11 – ротаметр водородный с игольчатым клапаном MV-394-H2 (Bronkhorst High-Tech BV, Нидерланды); 12 – вакуумный затвор; 13 – турбомолекулярный откачной пост T-Station 75 (Edwards, Англия).

Результаты и их обсуждение

В нашей более ранней работе [18] предполагалось, что процесс осаждения теллура в среде водорода сопровождается реакцией между водородом и жидким или твердым теллуrom с образованием газообразного H₂Te, с последующим термическим разложением последнего по реакции



приводящей к увеличению атомарного Te в равновесной газовой фазе. Такое дополнительное количество газообразного Te считалось ключом к получению эпитаксиальных пленок с высоким структурным совершенством. Однако проведенный нами более детальный термодинамический анализ системы Te–H₂ показал, что присутствие водорода не приводит к смещению равновесного отношения Te/Te₂ в газовой фазе. Отметим, что в равновесной газовой фазе над чистым теллуrom (без водорода) концентрация атомарного теллура ничтожно мала [19] и находится за пределами чувствительности масс-спектрометрического метода [15]. Выполненные нами термодинамические расчеты показали, что при проведении процесса испарения теллура в среде водорода существенной компонентой в газовой фазе оказывается сам теллуристый водород согласно реакции



Равновесное мольное отношение H₂Te/Te₂ в газовой фазе, согласно полученным термодинамическим оценкам, составляет: 185 при $T = 400$ К, 4,7 при $T = 500$ К, 0,37 при $T = 600$ К, 0,06 при $T = 700$ К. Видно, что при температуре зоны тигля образуется достаточно большое количество теллуrowодорода, который диффундирует в холодную зону осаждения и может выступать движущей силой зародышеобразования на поверхности подложки.

Процесс образования H₂Te_(г) по реакции (2) является сильно эндотермическим со стандартной теплотой реакции равной +99,6 кДж/моль, что приводит к быстрому уменьшению значения константы равновесия (3) с понижением температуры

$$K_p = P_{\text{H}_2\text{Te}} / P_{\text{H}_2}. \quad (3)$$

В связи с этим, диффузионный перенос молекул H₂Te, образовавшихся в зоне тигля (высокая температура), в зону подложки (низкая температура) сопровождается процессом диссоциативной адсорбции с выделением газообразного H₂ и накоплением атомарного теллура (Te) на ростовой поверхности. В данном случае подложка выступает катализатором данного процесса. Эта особенность является ключевой в предполагаемом нами механизме формирования эпитаксиальных пленок.

Из анализа большого количества работ, посвященных получению пленок теллура методом термовакуумного напыления, следует, что температура подложки в процессе осаждения не должна превышать 300 °С (см. например, [10–13]). Это может быть объяснено невозможностью нуклеации теллура в отсутствие центров зародышеобразования при низкой разнице в температурах подложки и тигля, приводящей к низкой степени пересыщения пара теллура. А при температурах около 300 °С поверхностная подвижность и реакционная способность физически адсорбированной тяжелой молекулы Te_2 низка для формирования пленок высокого структурного качества. В то же время при проведении процесса осаждения теллура без водорода отсутствует термализация сильно разреженной паровой фазы близи холодной поверхности осаждения, вследствие чего поток молекул Te_2 , попадая на подложку, приносит большое количество избыточной энтропии в ходе сильно удаленного от равновесия процесса осаждения.

При островковом механизме роста пленок выделяют следующие стадии: образование зародышей и островковой структуры, коалесценция (срастание островков), формирование сплошной пленки и ее дальнейший рост. В нашем случае, наличие на поверхности подложки наряду с Te_2 атомарного теллура (Te) приводит к возникновению многоатомных кластеров по схеме $\text{Te}_2 + \text{Te} \rightarrow \text{Te}_3$, $\text{Te}_3 + \text{Te} \rightarrow \text{Te}_4$, $\text{Te}_4 + \text{Te} \rightarrow \text{Te}_5$, и так далее. Отметим, что Te_i ($i = 3-7$) являются устойчивыми компонентами газовой равновесной фазы теллура [15]. По мере роста таких кластеров вероятность их десорбции с поверхности подложки резко уменьшается, и они становятся центрами зародышеобразования. Зародыши разрастаются до сверхкритических размеров как за счет мо-

лекул Te_2 , падающих на их поверхность непосредственно из газовой фазы, так и за счёт поступления к ним абсорбированных атомов Te , Te_2 , кластеров Te_i в результате поверхностной диффузии. Поскольку температура подложки (410–440 °С) близка к точке плавления теллура (450 °С), а также учитывая то, что реакция диссоциации теллуrowодорода (обратная к (2)) является сильно экзотермической (выделяется 99,6 кДж/моль тепла) и образование кластеров теллура сопровождается образованием новых связей, можно предположить, что зародыши теллура на ростовой поверхности образуются в виде жидкой фазы. Действительно, теплота плавления теллура составляет всего 17,4 кДж/моль [19], а, например, энтальпия реакции $\text{Te}_{2(\text{r})} = 2\text{Te}_{(\text{r})}$ оценивается как 65 кДж/моль [20]. Более того, в среде водорода, обладающего высоким значением теплопроводности, присутствует непрерывный поток тепла от тигля к подложке. Такие жидкофазные зародыши обладают вращательной и поступательной подвижностью, благодаря чему становится возможным их слияние с образованием более крупного островка. Энергия образования ориентированных островков меньше, чем разориентированных, поэтому они и растут быстрее, задавая, тем самым, кристаллографическую ориентацию будущей пленки.

На стадии коалесценции происходит стыковка островков друг с другом, в результате чего малые островки, вливающиеся в большие, также принимают эпитаксиальную ориентацию. На этом этапе формируется «мозаика» островковой фазы, состоящая из пустот, ограниченных кристаллографическими гранями. Данное предположение подтверждают РЭМ-снимки, снятые с тыльной стороны пленок (слоев) теллура, легко отслаиваемых от подложки (рис. 2).

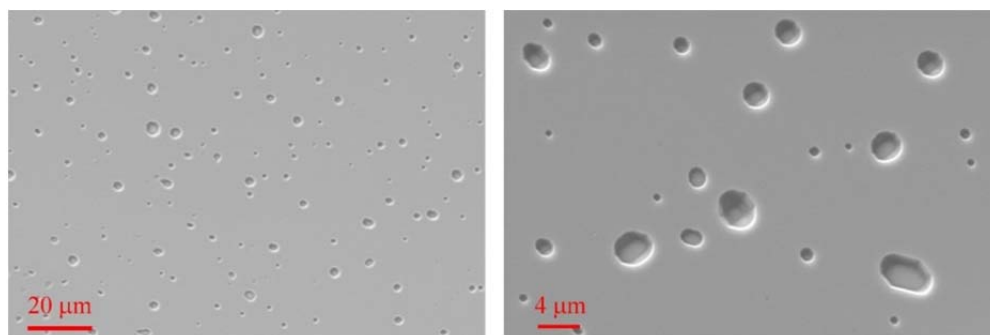


Рис. 2. РЭМ-снимки с тыльной поверхности эпитаксиальных пленок (слоев) теллура, отделенных от подложки.

Зародыше-островковый механизм с участием жидкокапельных частиц Те работает и после формирования сплошной пленки на протяжении всего автоэпитаксиального роста (рис. 3). Таким образом, как на стадии зародышеобразования, так и в процессе всего роста процесс кристаллизации пленок теллура происходит по механизму конденсации пар-жидкость-кристалл (ПЖК-механизм).

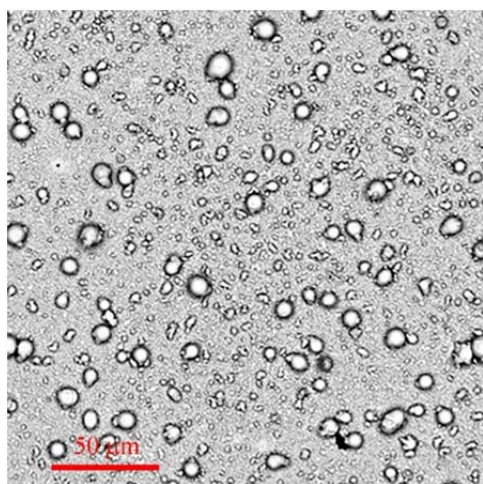


Рис. 3. РЭМ-снимок поверхности эпитаксиальной пленки теллура, толщиной 2,3 мкм.

Дифрактограммы эпитаксиальной пленки и монокристалла, выращенного из расплава методом Чохральского, приведены на рис. 4. Все дифракционные пики находятся в хорошем соответствии со стандартными данными для теллура (PDF-00-036-1452). Как видно из рисунка, для обоих образцов характерны узкие интенсивные рефлексы (100), (200), (300), при углах $23,2^\circ$, $47,1^\circ$, $73,7^\circ$, соответственно. Данные «отражения» соответствуют тригональной структуре теллура, которые можно трактовать и как пики 1, 2, 3 порядков, соответствующие отражению от плоскости (100), параллельной плоскости подложки, т. е. c -ось эпитаксиальной пленки Те лежит в плоскости подложки. На основе анализа по сопоставлению отношений интенсивностей пиков (100), (200), (300) для одного образца и их полуширины для разных образцов можно сделать вывод о том, что по структурному совершенству эпитаксиальная пленка превосходит монокристалл теллура.

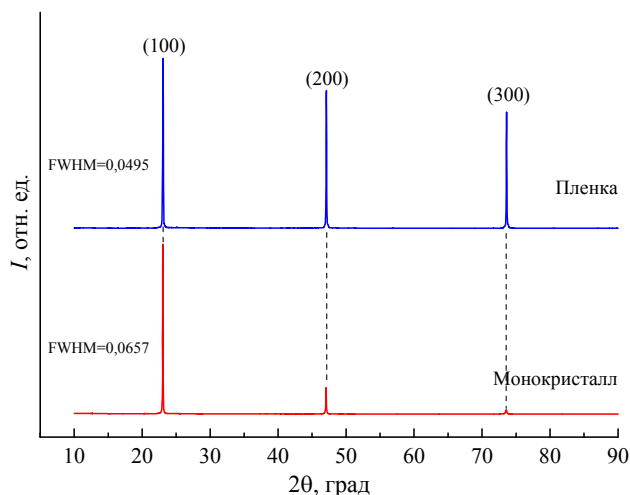


Рис. 4. Дифрактограммы эпитаксиальной пленки и монокристалла теллура.

Заключение

Предложен ПЖК-механизм конденсации, объясняющий основные стадии роста пленок теллура, получаемых методом термовакуумного напыления в среде водорода. Полученные пленки и слои (толщиной до 0,5 мм) Те обладают структурным совершенством, превосходящим структурное совершенство объемного монокристалла Те. Процесс кристаллизации допускает регулирование в широких пределах пересыщения в системе посредством изменения технологических параметров роста (температура зоны тигля и подложки, перепад температур между этими зонами, давление водорода в системе). Это позволило выбрать оптимальные технологические режимы синтеза микропластинок, нитевидных кристаллов (полых и сплошных) теллура. Результаты работы в этом направлении будут отражены в следующих наших публикациях. Мы также полагаем, что данный метод имеет хорошие перспективы и для получения теллурена – новейшего представителя семейства 2D-материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00808А.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Grosse P.* Die Festkörper Eigenschaften von Tellur. Springer Tracts in Modern Physics. – Berlin, 1969. P. 208.
2. *Zhen H., Yuan Y., Jian-Wei L., Shu-Hong Y.* // Chem. Soc. Rev. 2017. Vol. 46. P. 2732.
3. *Keshab R. Sapkota, Ping Lu, Douglas L. Medlin, George T. Wang* // APL Mater. 2019. Vol. 7. P. 081103.
4. *Yuanyuan P., Shiyuan G., Li Y., Jing L.* // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. B98. P. 085135.
5. *Zhili Z., Xiaolin C., Seho Y., Jinglei C., Yawei D., Chunyao N., Zhengxiao G., Maohai X., Feng L., Jun-Hyung C., YuJia, Zhenyu Z.* // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 119. P. 106101.
6. *Gang Q., Yixiu W., Yifan N., Yongping Z., Kyeongjae C., Wenzhuo W., Peide D. Y.* // Nano Lett. 2018. Vol. 18. P. 5760.
7. *Wenzhuo Wu, Gang Q., Yixiu W., Ruoxing W., Peide Ye.* // Chem. Soc. Rev. 2018. Vol. 47. P. 7203.
8. *Dawei W., Aijun Y., Tiansong L., Chengyu F., Jianbin P., Zhu Liu, Jifeng Chu, Huan Y., Xiaohua W., Mingzhe R., Nikhil K.* // J. Mater. Chem. A. 2019. Vol. 10. P. 1039.
9. *Chenfei S., Yihang L., Jiangbin W., Chi X., Dingzhou C., Zhen L., Qingzhou L., Yuanrui L., Yixiu W., Xuan C., Hiroyuki K., Fuyuki Sh., Aravind K., Rajiv K. K., Aiichiro N., Priya D. Vashishta, Mor R. A., Ahmad N. Abbas, H. W., Wenzhuo W., Chongwu Z.* // ACS Nano. 2020. Vol. 14. P. 303.
10. *Capers M. J., White M.* // Thin Solid Films. 1971. Vol. 8. P. 353.
11. *Athwal I. S., Bedi R. K.* // Japanese Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 26. № 9. P. 1413.
12. *Rusu M.* // Appl. Phys. A. 1998. Vol. 66. P. 357.
13. *Sergio V., Paola P., Paola L., Alessandro di B.* // Thin Solid Films. 1999. Vol. 352. P. 114.
14. *Manouchehrian M., Larjani M. M., Elahi S. M., Moghri Moazzen M. A.* // Appl. Phys. A. 2015. Vol. 119. P. 659.
15. *Viswanathan R., Balasubramanian R., Darwin Albert Raj D., Sai Baba M., Lakshmi Narasimhan T. S.* // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 603. P. 75.
16. *Okuyama K., Kumagai Y.* // Thin Solid Films. 1986. Vol. 141. P. 71.
17. *Hristova-Vasileva T., Bineva I., Todorov R., Dinescu A., Romanitan C.* // 20th International School on Condensed Matter Physics (Journal of Physics: Conf. Series 2019), p. 1186.
18. *Ismailov A. M., Shapiev I. M., Rabadanov M. K., Aliev I. S.* // Tech. Phys. Lett. 2015. Vol. 41. P. 83.
19. *Ubelis A. P.* // Journal of Engineering Physics. 1982. Vol. 42. № 3. P. 309.
20. *Вуздорovich Е. Н.* // Известия вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 5. С. 446.

PACS: 68.55.A

The process of preparation of tellurium epitaxial films and layers with high structural perfection during vapor-deposition process in the pure hydrogen environment

M. R. Rabadanov¹, I. M. Shapiev¹, A. O. Kuzmin², and A. M. Ismailov¹

¹ Dagestan State University
43a Gadjeva, Makhachkala, 367000, Russia

² Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
5 Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received November 06, 2020

The work is devoted to studying a new methodology for epitaxial films preparation on the mica (muscovite) plates and based on carrying out the tellurium vapor-deposition process in the pure hydrogen environment. The formation of H₂Te molecules during reaction of H₂ with solid Te in the hot zone, diffusion of H₂Te towards the cold surface with efficient thermalization due to high thermal conductivity of H₂, H₂Te dissociative adsorption on the growth surface followed by H₂ desorption and atomic Te accumulation are considered as key steps of crystalline epitaxial films formation. Atomic Te assists the appearance and growth of directional liquid nucleuses at cold plate temperatures near Te melting point (about 450 °C). During coalescence of these liquid nucleuses the gradual formation of a liquid film is observed with a mosaic of voids of various size. After continuous liquid sheet formation, auto-epitaxial film growth be-

gins also taking place according to vapor-liquid-crystal process described. The structural perfection of films formed is closed to three-dimensional monocrystalline samples. As a result, Te films with such characteristics may be put to use in various branches of micro-, opto-, acoustoelectronics.

Keywords: tellurium, epitaxial films, thermal vacuum deposition, structure perfection, surface morphology, vapor-liquid-crystal deposition mechanism.

REFERENCES

1. P. Grosse, Die Festkörper Eigenschaftenvon Tellur. Springer Tractsin Modern Phys. (Berlin 1969).
2. H. Zhen, Y. Yuan, L. Jian-Wei, and Y. Shu-Hon, Chem. Soc. Rev. **46**, 2732 (2017).
3. R. Keshab Sapkota, Lu Ping, L. Douglas Medlin, and T. George Wang, APL Mater. **7**, 081103 (2019).
4. P. Yuanyuan, G. Shiyuan, Y. Li, L. Jing, Phys. Rev. Lett. **B 98**, 085135 (2018).
5. Z. Zhili, C. Xiaolin, Y. Seho, C. Jinglei, D Yawei., N. Chunyao, G. Zhengxiao, X. Maohai, L. Feng, C. Jun-Hyung, Yu Jia, and Z. Zhenyu, Phys. Rev. Lett. **119**, 106101 (2017).
6. Q. Gang, W. Yixiu, N. Yifan, Z. Yongping, C. Kyeongjae, W. Wenzhuo, and D. Y. Peide, Nano Lett. **18**, 5760 (2018).
7. W. Wenzhuo, Q. Gang, W. Yixiu, W. Ruoxing, and Y. Peide, Chem. Soc. Rev. **47**, 7203 (2018).
8. W. Dawei, Y. Aijun, L. Tiansong, F. Chengyu., P. Jianbin., L. Zhu, C. Jifeng, Y. Huan, W. Xiaohua, R. Mingzhe, and K. Nikhil, J. Mater. Chem. A. **10**, 1039 (2019).
9. S. Chenfei, L. Yihang, W. Jiangbin, X Chi., C. Dingzhou, L. Zhen, L. Qingzhou, L. Yuanrui, W. Yixiu, C. Xuan, K. Hiroyuki, Sh. Fuyuki, K. Aravind, K. K. Rajiv, N. Aiichiro, D. Priya, Vashishta, R. A. Mor, N. Ahmad, H. W. Abbas, W. Wenzhuo, and Z. Chongwu, ACS Nano. **14**, 303 (2020).
10. M. J. Capers and M. White, Thin Solid Films. **8**, 353 (1971).
11. I. S. Athwal and R. K. Bedi, Japanese Jour. of Appl. Physics. **26** (9), 1413 (1987).
12. M. Rusu, Appl. Phys. A. **66**, 357 (1998).
13. V. Sergio, P. Paola, L. Paola, and B. Alessandro, Thin Solid Films. **352**, 114 (1999).
14. M. Manouchehrian, M. M. Larijani, S. M. Elahi, and M. A. Moghri Moazzen, Appl. Phys. A. **119**, 659 (2015).
15. R. Viswanathan, R. Balasubramanian, D. Darwin Albert Raj, M. Sai Baba, and T. S. Lakshmi Narasimhan, Jour. of Alloys and Compounds **603**, 75 (2014).
16. K. Okuyama and Y. Kumagai, Thin Solid Films **141**, 71 (1986).
17. T. Hristova-Vasileva, I. Bineva, R. Todorov, A. Dinescu and C. Romanitan, *20th International School on Condensed Matter Physics* (Journal of Physics: Conf. Series 2019), p. 1186.
18. A. M. Ismailov, I. M. Shapiev, M. K. Rabadanov, and I. S. Aliev, Tech. Phys. Lett. **41**, 83 (2015).
19. A. P. Ubelis, Jour. of Engineering Physics **42** (3), 309 (1982).
20. E. N. Vigdorovich, Izvestiya vuzov. Elektronika **23** (5), 446 (2018).