

Импульсное лазерное напыление полупроводниковых тонких пленок III-V: обзор

О.В. Девицкий^{1,2}

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

v2517@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.621

Аннотация: В настоящем обзоре описываются новейшие достижения в области импульсного лазерного напыления полупроводниковых тонких пленок III-V на различные подложки. Показано, что метод импульсного лазерного напыления является перспективным и достаточно эффективным для получения тонких пленок широкого спектра материалов и принципиально отличается от всех известных методов получения тонких пленок тем, что он является дискретным. Эпитаксиальный рост тонких пленок III-V важен для создания новых приборов современной оптоэлектроники. В обзоре приводятся экспериментально полученные зависимости влияния некоторых параметров метода импульсного лазерного напыления на структурные, оптические, некоторые электрические свойства и стехиометрию состава бинарных и многокомпонентных тонких пленок III-V. Показано, что получения наиболее структурно совершенных тонких пленок III-V необходимо использовать фемто- и наносекундные лазеры с длиной волны от 248 нм до 532 нм, плотность энергии в импульсе должна составлять 3 Дж/см², а значение температуры подложки должно находиться в диапазоне от 300°C до 400°C. Мишень должна быть монокристаллической и иметь наиболее возможную плотность.

Ключевые слова: импульсное лазерное напыление, тонкие пленки, соединения III-V, температура подложки, плотность энергии, стехиометрия.

1. Введение

Одним из современных перспективных методов получения полупроводниковых тонких пленок (ТП) и гетероструктур на различных типах подложек является импульсное лазерное напыление (ИЛН). Импульсное лазерное напыление является методом физического осаждения из паровой фазы, при котором лазерный луч фокусируется на мишени с составом, который должен быть перенесен на подложку [1-4]. Материал мишени испаряется лазерным импульсом, образуя высокоэнергетический плазменный факел, который расширяется от мишени и осаждается в виде тонкой пленки на подложке, расположенной напротив мишени [5]. Существует более десяти вариантов техники ИЛН [2, 6-8], среди которых можно выделить: лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия (ИЛН в сверхвысоком вакууме) [9, 10]; а также для компенсации некоторых летучих компонентов в присутствии активного (кислород, азот [11, 12]) или пассивного (аргон) фоновых газа, который контролирует кинетическую энергию аблированных атомов, попадающих на подложку,

что в дальнейшем определяет процессы зарождения и роста пленки [13].

Благодаря стехиометрическому осаждению и простоте контроля параметров ИЛН является наиболее часто используемых методов для получения высококачественных многокомпонентных ТП полупроводниковых соединений [14], мультиферроиков [15], диэлектриков [16], полимеров [17] и даже органических и биологических ТП [18, 19]. Структурные, оптические свойства и морфология поверхности полупроводниковых пленок, выращенных методом ИЛН зависят от оптимизации взаимозависимых параметров напыления *in-situ*: температура подложки, плотности энергии в лазерном импульсе, состава и способа формирования мишени, расстояния между мишенью и подложкой, давления и состава фонового газа [20]. По сравнению с другими методами физического осаждения из паровой фазы, пленки, полученные ИЛН, могут быть выращены при более низкой температуре осаждения из-за высоких кинетических энергий ионизированных и выбрасываемых частиц плазменного факела [21].

В настоящем обзоре представляются работы, посвящённые импульсному лазерному напылению полупроводниковых пленок соединений *III–V* на различные подложки, сделанные с момента открытия метода ИЛН.

2. Обзор современных достижений метода импульсного лазерного напыления при получении полупроводниковых тонких пленок

Метод ИЛН впервые был описан в 1965 году Смитом и Тернером [22]. Ими были впервые проведены эксперименты по получению ТП различных соединений в числе которых были *InAs* и *InSb*. Эксперименты по получению этих ТП не увенчались особым успехом. Из-за неоптимальных параметров ИЛН: использовался рубиновый лазер с длиной волны 694,3 нм, что приводило к инконгруэнтной абляции мишеней *InAs*, *InSb*; давление остаточных газов в вакуумной камере было достаточно высоким – 0,01 Па, что приводил к увеличению апертуры угла плазменного факела; расстояние между мишенью и подложкой не превышало 50 мм, а энергия в импульсе была очень высока – 3 Дж. Впрочем для получения иных соединений таких как *ZnTe* и *PbTe* метод ИЛН тогда зарекомендовал себя в качестве достаточно перспективного и универсального, который к тому же обеспечивал относительно высокую стехиометрию, полученных ТП. На данный момент методом ИЛН получены ТП практически всех соединений *III–V* стабильных при нормальных условиях.

Наибольшее количество работ посвящено получению ТП базового для соединения *III–V* - *GaAs* на различных типах подложек. Первый

успешный гетероэпитаксиальный рост ТП $GaAs$ на подложке $NaCl$ методом ИЛН был описан русскими исследователями Шефталем и Щербаковым в своей основополагающей работе [23] в 1981 году, в которой изучался механизм роста ТП $GaAs$ при ИЛН в сверхвысоком вакууме. Было установлено, что параметры ИЛН могут гибко влиять на процессы зародышеобразования и роста пленки и наиболее важно контролировать количество атомов материала мишени за единичный лазерный импульс с количеством центров предпочтительной адсорбции, имеющих на подложке. Плотность дислокаций в пленках стехиометрического состава $GaAs$ не превышала 10^7 см^{-2} . Также были объяснены причины снижения температуры подложки вплоть до 290°C при которой возможно получение монокристаллической пленки $GaAs$. В [24] исследовано влияние температуры кремниевой подложки на изменение структурных свойств и морфологии поверхности тонкой пленки $GaAs$. Размер кристаллита для пленок увеличивался с ростом температуры подложки выше 285°C . Увеличение размера кристаллита не приводило к значительному увеличению шероховатости поверхности пленки.

Первый экспериментально обнаруженный полуметаллический материал Вейля – $TaAs$ описан в статье [25]. В статье освещена проблема выращивания тонкой пленки $TaAs$ стехиометрического состава, что было технологически сложно из-за улетучивания As во время роста. Чтобы решить эту проблему, ТП $TaAs$ выращивались на подложках различных подложках с малым рассогласованием параметра решетки и $GaAs$ (111) с использованием мишеней с различными стехиометрическими соотношениями As ($TaAs$, $TaAs_{1,1}$ и $TaAs_{1,2}$). Показано, что ИЛН ТП $TaAs$ из мишени $TaAs_{1,2}$ на подложках не содержащих в своем составе As стехиометрические пленки не образуются, избыточный As легко сублимируется из мишени. ТП $TaAs$, полученные на подложках $GaAs$ были максимально близки к стехиометрическому составу. Было обнаружено, что атомы As из подложки $GaAs$ диффундируют в ТП $TaAs$ во время роста. Таким образом, несоответствие решеток не является ключевой причиной отклонения от стехиометрии $TaAs$, в то время как диффузия атомов As из подложки может играть важную роль при ИЛН ТП арсенидов III–V.

В [26] были успешно получены ТП $InSb$ из поликристаллической мишени $InSb$ ($In:Sb = 50:50$ методом импульсного лазерного напыления на подложках Si (100) в вакууме, при температурах подложки от 25 до 400°C . Отмечено, что стехиометрия ТП зависит от температуры подложки, стехиометрический состав пленок ТП был получен при температурах подложки более 300°C . Авторы связывают это с большой разницей в температуре плавления In и Sb эффектом десорбции атомов индия с поверхности подложки. Результаты рентгеновской дифракции показали,

что с ростом температуры подложки от 200 до 400°C средний размер кристаллита *InSb* увеличивался в 2,5 раза от 138 нм до ~345 нм соответственно. Плотность дислокаций в тонкой пленке уменьшалась с $15,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ до $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ при 200 до 400°C соответственно. Однако в работе также показано, что снижение температуры подложки с 0,5 эВ при 300°C до 0,18 эВ 400°C позволяет снижать оптическую ширину запрещенной зоны почти в три раза по сравнению со значением для объемного материала, что связано с эффектом квантового ограничения в сочетании с эффектом заполнения зоны сдвига Бурштейна–Мосса. Похожие результаты были получены в [27] получении ТП *AlSb* при помощи *KrF* – лазера с длиной волны 248 нм при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Результаты показали, что ТП *AlSb* имели поликристаллическую структуру при температуре подложки выше 300°C. Средний размер кристаллитов для ТП *AlSb* увеличивался с 8 до 15 нм при увеличении температуры подложки от 300 до 400°C соответственно, а электрическое сопротивление уменьшалось с ростом температуры подложки от $1,64 \cdot 10^{-2}$ до $1,44 \cdot 10^{-2}$ Ом·см. При температуре подложки 400°C оптическая ширина запрещенной зоны тонкой пленки *AlSb* составила 1,82 эВ. В [28] на стеклянных подложках при $5 \cdot 10^{-3}$ Па из прессованной мишени порошка *AlSb* и 0,1 ат.% *Zn* были получены ТП *AlSb* легированные *Zn*. Структурные свойства поликристаллических ТП *AlSb:Zn* улучшались с ростом температуры подложки. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии тонкой пленки *AlSb:Zn*, полученной при температуре подложки 400°C, определен максимум валентной зоны, который составил –0,78 эВ для пленки *AlSb:Zn*. Это означает, что уровень Ферми находится ниже максимума валентной зоны и ТП *AlSb:Zn* имеют *p*-тип проводимости. Сопротивление ТП *AlSb:Zn* уменьшалось от $7,5 \cdot 10^{-2}$ до $4,3 \cdot 10^{-2}$ Ом·см по мере увеличения температуры подложки от 300°C до 400°C. ТП *GaSb* стехиометрического состава полученные ИЛН на кремниевых подложках были получены в [29]. Для ИЛН использовался *KrF* – лазер, находящийся на расстоянии 55 мм от мишени, плотность мощности составляла 1,5 Дж/см², в качестве фонового газ применялся *Ar* при давлении 0,1 Па. В качестве мишени был использован спеченный и спрессованный порошок стехиометрического состава и монокристаллическая мишень *GaSb*. Показано, что невозможно достичь стехиометрического состава тонкой пленки *GaSb* с использованием порошковой спеченной мишени, в то время как из монокристаллической мишени были выращены эпитаксиальные ТП с очень близким к стехиометрическому составом.

О ИЛН ТП *InP* на подложки *GaAs* (100) при помощи эксимерного лазера *XeCl* с длиной волны 308 нм в атмосфере аргона и в высоком вакууме описывается в работе [30]. На подложках *GaAs* при температуре

300°C и давлении $1,3 \cdot 10^{-6}$ Па были получены эпитаксиальные ТП *InP* с ориентированными полиэдрическими островками в некоторых областях и средней шероховатостью поверхности около 3,6 нм. Было обнаружено, что при ИЛН мишени *InP* эксимерным *XeCl*-лазером с плотностью энергии лазерного импульса не более $0,5 \text{ Дж/см}^2$ перенос материала мишени на поверхность подложки является конгруэнтным. ТП *InP* имели стехиометрический состав, а снижения концентрации фосфора из-за термического разложения и десорбции отмечено не было. В [3] сообщается о получении поликристаллических пленок *InP* на стеклянных подложках с помощью *Nd:YAG*-лазера с длиной волны 1064 нм и плотности энергии лазерного импульса с 2 Дж/см^2 из монокристаллической мишени *InP* при давлении 10^{-3} Па. Отмечено, что стехиометрический состав имели пленки *InP*, полученные при температуре подложки 200°C, а средний размер кристаллита в тонкой пленке был равен 60 нм. При температуре подложки 400°C ТП *InP* имели включения металлического *In*, а ТП, полученные при температуре подложки 600°C не имели в своем составе *InP*, а были образованы из смеси металлического *In* и *In₂O₃*.

Четырехкомпонентные ТП *GaInAsP* на подложках *GaAs* (100) были получены в [32]. Для ИЛН использовался наносекундный лазер с длинной волны 532 нм, а монокристаллическая мишень была сформирована сплавлением бинарных компонентов *GaAs*, *InAs*, *InP* в атмосфере водорода. Установлено, что увеличение плотности энергии лазерного импульса с 2 до $3,2 \text{ Дж/см}^2$ приводит к увеличению среднеквадратичной шероховатости поверхности пленок *GaInAsP* с 0,24 до 0,34 нм. Также высказано предположение, что в при ИЛН из мишени *GaInAsP* при увеличении плотности энергии лазерного импульса приводит к изменению поверхностной диффузии *In* в процессе роста пленки, что приводит к перераспределению связей *In–P* и *Ga–P* в твердом растворе *GaInAsP*. Показано, что в процессе ИЛН рост тонкой пленки *GaInAsP* происходит в две стадии. На первой стадии в соответствии с механизмом роста Фольмера–Вебера происходит зарождение островков и последующая эволюция их размеров. Зародыши были образованы *GaAs*, *GaInAs*, *GaAsP* и *GaInAsP*, что подтверждается методом малоугловой рентгеновской дифракции. На второй стадии происходит переход к квазипослойному росту тонкой пленки путем сглаживания шероховатостей за счет преобладания сильного поверхностного транспорта атомов, а не увеличения плотности островков, что подтверждается результатами атомно-силовой микроскопии. Получение и исследование эпитаксиального роста тонкой пленки более сложного четырехкомпонентного твердого раствора *GaInAsBi* на подложке *Si* (001) рассмотрено в [33]. По результатам исследования методами просвечивающей электронной

микроскопии и высокоразрешающей рентгеновской дифракции установлено, что тонкая пленка *GaInAsBi* выращена с большим рассогласованием параметров решетки – 7,838 % и содержанием *Bi* 5,8 %. Показано, что пленка имеет хорошо выраженную текстуру в направлении роста [001], а параметр решетки равен 5,856 Å. Впервые, методом рассеяния ионов средней энергии было исследовано распределение состава тонкой пленки *GaInAsBi* по толщине. Обнаружено, что уменьшение концентрации *In* отмечено после толщины тонкой пленки 15 нм от 0,5 до 0,4 мол. долей. Важным результатом является то, что распределение *Bi* по толщине тонкой пленки является однородным. Структурные исследования, позволили сделать вывод авторам, что релаксация напряжений происходила за счет сдвигов путем зарождения дислокаций и скольжения плотноупакованных плоскостей {111}, а также двойникования, что привело к изменению состава после толщины тонкой пленки около 15 нм от подложки и увеличению шероховатости поверхности слоя.

3. Заключение

На свойства и стехиометрию состава ТП *III–V* влияет достаточно большое число параметров метода ИЛН. Наибольшее влияние оказывают: плотность энергии лазерного импульса, длина волны и длительность лазерного импульса, материал и температура подложки, а также структура и плотность мишени. Уменьшение длины волны лазера при ИЛН до 248 нм позволяет получать все существующие на сегодняшний день ТП *III–V* стехиометрического состава за счет конгруэнтного переноса материала мишени на поверхность подложки. Увеличение плотности существенным образом не улучшает свойства ТП, в то время как снижение длительности импульса приводит к улучшению морфологии поверхности ТП. Оптимальная температура подложки для ИЛН ТП *III–V* находится в диапазоне 300-400°C. Плотность мишени должна быть как можно больше, для ИЛН многокомпонентных ТП необходимо использовать спеченные монокристаллические мишени. Таким образом, ИЛН является гибким и эффективным методом получения ТП *III–V*. По сравнению с другими методами физического осаждения из паровой фазы, пленки, полученные методом ИЛН при оптимальных параметрах, имеют достаточно высокую стехиометрию состава и могут быть выращены при более низких температурах подложки. Основным недостатком ИЛН является сложность в выборе оптимальных параметров для получения ТП. Устранить этот недостаток возможно за счет большего числа исследований физических основ ИЛН и взаимосвязи его параметров.

Публикация выполнена в рамках государственного задания федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН № 122020100326-7.

Библиографический список:

1. **Shepelin, N.A.** A practical guide to pulsed laser deposition / N.A. Shepelin, Z.P. Tehrani, N. Ohannessian et al. // *Chemical Society Reviews*. – 2023. – V. 52. – I. 7. – P. 2294-2321. DOI: 10.1039/d2cs00938b.
2. **Conde Garrido, J.M.** A review of typical PLD arrangements: Challenges, awareness, and solutions / J.M. Conde Garrido, J.M. Silveyra // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2023. – V. 168. – Art. № 107677. – 19 p. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107677.
3. **Wang, B.** Recent progress in high-performance photo-detectors enabled by the pulsed laser deposition technology / B. Wang, Z. Bin Zhang, S.P. Zhong et al. // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2020. – V. 8. – I. 15. – P. 4988-5014. DOI: 10.1039/c9tc07098b.
4. **Masood, K.B.** A comprehensive tutorial on the pulsed laser deposition technique and developments in the fabrication of low dimensional systems and nanostructures / K. B. Masood, P. Kumar, M.A. Malik et al. // *Emergent Materials*. – 2021. – V. 4. – I. 3. – P. 737-754. DOI: 10.1007/s42247-020-00155-5.
5. **Ojeda-G-P, A.** Influence of plume properties on thin film composition in pulsed laser deposition / A. Ojeda-G-P, M. Döbeli, T. Lippert // *Advanced Materials Interfaces*. – 2018. – V. 5. – I. 18. – Art. № 1701062. – 16 p. DOI: 10.1002/admi.201701062.
6. **Wolfman, J.** Interface combinatorial pulsed laser deposition to enhance heterostructures functional properties / J. Wolfman, B. Negulescu, A. Ruyter et al. In book: *Practical Applications of Laser Ablation*; ed. by D. Yang. – London: IntechOpen Limited, 2021. – P. 3-21. DOI: 10.5772/intechopen.94415.
7. **Eason, R.W.** Multi-beam pulsed laser deposition for advanced thin-film optical waveguides / R.W. Eason, T.C. May-Smith, K.A. Sloyan et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – V. 47. – № 3. – Art. № 034007. – 15 p. DOI: 10.1088/0022-3727/47/3/034007.
8. **Stokker-Cheregi, F.** Photoluminescence of Eu-doped LiYF₄ thin films grown by pulsed laser deposition and matrix-assisted pulsed laser evaporation / F. Stokker-Cheregi, A. Matei, M. Dinescu et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – V. 47. – № 4. – Art. № 045304. – 6 p. DOI: 10.1088/0022-3727/47/4/045304.
9. **Aggarwal, V.** Fabrication of ultra-violet photodetector on laser MBE grown epitaxial GaN nanowalls on sapphire (11-20) / V. Aggarwal, S. Gautam, U. Varshney et al. // *Journal of Materials Research*. – 2023. – V. 38. – I. 2. – P. 429-438. DOI: 10.1557/s43578-022-00828-3.
10. **Девичкий, О.В.** Исследование состава пленок GaAs_{1-y}Bi_y, полученных методом импульсного лазерного напыления / О.В. Девичкий, А.А. Кравцов, И.А. Сысоев // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 96-105. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.096.
11. **Девичкий, О.В.** Структура и состав тонких пленок GaAs_{1-x-y}N_xBi_y, полученных методом импульсного лазерного напыления / О.В. Девичкий // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2022. – Вып. 14. – С. 593-601. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.593.
12. **Devitsky, O.V.** Pulsed laser deposition of gallium nitride thin films on sapphire substrates / O.V. Devitsky, D.A. Nikulin, I.A. Sysoev // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – V. 2313. – P.030012-1-030012-5. DOI: 10.1063/5.0032227.
13. **Rout, S.** Phase growth control in low temperature PLD Co: TiO₂ films by pressure / S. Rout, N. Popovici, S. Dalui et al. // *Current Applied Physics*. – 2013. – V. 13. – I. 4. – P. 670-676. DOI: 10.1016/j.cap.2012.11.005.
14. **Pashchenko, A.S.** Growth of nanotextured thin films of *GaNAsP* and *GaNAsSbBi* solid solutions on *GaP* substrates by pulsed laser deposition / A.S. Pashchenko, O.V. Devitsky, L.S. Lunin et al. // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2023. – V. 14. – I. 5. – P. 601-605. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-601-605.
15. **García, D.M.A.** Exploring morphological variation in bismuth ferrite nanostructures by pulsed laser deposition: synthesis, structural and electrochemical properties / D.M.A. García, R.D. Santos, L. Liu et al. // *Nanotechnology*. – 2024. – V. 35. – I. 23. – P. 235702-1-235702-8. DOI: 10.1088/1361-6528/ad2ee1.
16. **Luo, J.** AlN/nitrided sapphire and AlN/non-nitrided sapphire hetero-structures epitaxially grown by pulsed laser deposition: A comparative study / J. Luo, W. Wang, Y. Zheng et al. // *Vacuum*. – 2017. – V. 143. – P. 241-244. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.06.012.
17. **Palla-Papavlu, A.** Characterization of polymer thin films obtained by pulsed laser deposition / A. Palla-Papavlu, V. Dinca, V. Ion et al. // *Applied Surface Science*. – 2011. – V. 257. – I. 12. – P. 5303-5307. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.140.
18. **Socol, M.** Organic thin films deposited by matrix-assisted pulsed laser evaporation (MAPLE) for photovoltaic cell applications: A review / M. Socol, N. Preda, G. Socol // *Coatings*. – 2021. – V. 11. – I. 11. – Art. № 1368. – 32 p. DOI: 10.3390/coatings11111368.
19. **Hopp, B.** Femtosecond pulsed laser deposition of biological and biocompatible thin layers / B. Hopp, T. Smausz, G. Kecskeméti et al. // *Applied Surface Science*. – 2007. – V. 253. – I. 19. – P. 7806-7809.

DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.102.

20. **Harris, S.B.** Deep learning with plasma plume image sequences for anomaly detection and prediction of growth kinetics during pulsed laser deposition / S.B. Harris, C.M. Rouleau, K. Xiao et al. // *npj Computational Materials*. – 2024. – V. 10. – I. 1. – Art. № 105. – 8 p. DOI: 10.1038/s41524-024-01275-w.

21. **Anyanwu, V.O.** PLD of transparent and conductive AZO thin films / V.O. Anyanwu, M.K. Moodley // *Ceramics International*. – 2023. – V. 49. – I. 3. – P. 5311-5318. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.10.054.

22. **Smith, H.M.** Vacuum deposited thin films using a ruby laser / H.M. Smith, A.F. Turner // *Applied Optics*. – 1965. – V. 4. – I. 1. – P. 147-148. DOI: 10.1364/ao.4.000147.

23. **Sheftal, R.N.** Mechanism of condensation of heteroepitaxial A^3B^5 layers pulse of moderate power / R.N. Sheftal, I.V. Cherbakov // *Crystal Research and Technology*. – 1981. – V. 16. – I. 8. – P. 887-891. DOI: 10.1002/crat.19810160805.

24. **Chowdhury, F.R.** Nanocrystalline GaAs thin films by pulsed laser deposition / F.R. Chowdhury, M. Gupta, Y.Y. Tsui // *Photonics North 2012, 6-8 June 2012, Montréal, Canada: proceedings of SPIE*; ed. by J.-C. Kieffer. – Bellingham, WA: SPIE Publ., 2012. – V. 8412. – P. 84121U-1-84121U-7. DOI: 10.1117/12.2001471.

25. **Li, S.** Exploration of growth conditions of TaAs Weyl semimetal thin film using pulsed laser deposition / S. Li, Z. Lin, W. Hu et al. // *Chinese Physics B*. – 2023. – V. 32. – I. 4. – Art. № 047103. – 9 p. DOI: 10.1088/1674-1056/acb913.

26. **Nguyen Van, T.** Tunability of optical properties of InSb films developed by pulsed laser deposition / T. Nguyen Van, E. Laborde, C. Champeaux et al. // *Applied Surface Science*. – 2023. – V. 619. – Art. № 156756. – 12 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.156756.

27. **Tang, P.** Structural, electrical and optical properties of AlSb thin films deposited by pulsed laser deposition / P. Tang, B. Li, L. Feng et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 692. – P. 22-25. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.016.

28. **Tang, P.** The properties of Zn-doped AlSb thin films prepared by pulsed laser deposition / P. Tang, W. Wang, B. Li et al. // *Coatings*. – 2019. – V. 9. – I. 2. – Art. № 136. – 9 p. DOI: 10.3390/coatings9020136.

29. **Yimam, D.T.** Pulsed laser deposited stoichiometric GaSb films for optoelectronic and phase change memory applications / D.T. Yimam, H. Zhang, J. Momand, B.J. Kooi // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2021. – V. 133. – Art. № 105965. – 9 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105965.

30. **Hafez, M.A.** Pulsed laser deposition of InP thin films on sapphire (1000) and GaAs (100) / M.A. Hafez, K.A. Elamrawi, H.E. Elsayed-Ali // *Applied Surface Science*. – 2004. – V. 233. – I. 1-4. – P. 42-50. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.02.066.

31. **Iribarren, A.** Growth of polycrystalline InP thin films by the pulsed laser deposition technique / A. Iribarren, R. Castro-Rodríguez, L. Ponce-Cabrera, J.L. Peña // *Thin Solid Films*. – 2006. – V. 510. – I. 1-2. – P. 134-137. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.12.302.

32. **Pashchenko, A.S.** Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition / A.S. Pashchenko, O.V. Devitsky, L.S. Lunin et al. // *Thin Solid Films*. – 2022. – V. 743. – Art. № 139064. – 8 p. DOI: 10.1016/J.TSF.2021.139064.

33. **Pashchenko, A.S.** Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition / A.S. Pashchenko, O.V. Devitsky, M.L. Lunina et al. // *Vacuum*. – 2024. – V. 227. – Art. № 113372. – 9 p. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.

References:

1. Shepelin N.A., Tehrani Z.P., Ohannessian N. et al. A practical guide to pulsed laser deposition, *Chemical Society Reviews*, 2023, vol. 52, issue 7, pp. 2294-2321. DOI: 10.1039/d2cs00938b.

2. Conde Garrido J.M., Silveyra J.M. A review of typical PLD arrangements: Challenges, awareness, and solutions, *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, vol. 168, art. no. 107677, 19 p. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107677.

3. Wang B., Bin Zhang Z., Zhong S.P. et al. Recent progress in high-performance photo-detectors enabled by the pulsed laser deposition technology, *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 8, issue 15, pp. 4988-5014 DOI: 10.1039/c9tc07098b.

4. Masood K.B., Kumar P., Malik M.A. et al. A comprehensive tutorial on the pulsed laser deposition technique and developments in the fabrication of low dimensional systems and nanostructures, *Emergent Materials*, 2021, vol. 4, issue 3, pp. 737-754. DOI: 10.1007/s42247-020-00155-5.

5. Ojeda-G-P, A., Döbeli, M., Lippert, T. Influence of plume properties on thin film composition in pulsed laser deposition, *Advanced Materials Interfaces*, 2018, vol. 5, issue 18, art. no. 1701062, 16 p. DOI: 10.1002/admi.201701062.

6. Wolfman J., Negulescu B., Ruyter A. et al. Interface combinatorial pulsed laser deposition to enhance

- heterostructures functional properties, *Practical Applications of Laser Ablation*, ed. by D. Yang. London, IntechOpen Limited, 2021, pp. 3-21. DOI: 10.5772/intechopen.94415.
7. Eason R.W., May-Smith T.C., Sloyan K.A. et al. Multi-beam pulsed laser deposition for advanced thin-film optical waveguides, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, vol. 47, no. 3, art. no 034007, 15 p. DOI: 10.1088/0022-3727/47/3/034007.
8. Stokker-Cheregi F., Matei A., Dinescu M. et al. Photoluminescence of Eu-doped LiYF₄ thin films grown by pulsed laser deposition and matrix-assisted pulsed laser evaporation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, vol. 47, no. 4, art. no. 045304, 6 p. DOI: 10.1088/0022-3727/47/4/045304.
9. Aggarwal V., Gautam S., Varshney U. et al. Fabrication of ultra-violet photodetector on laser MBE grown epitaxial GaN nanowalls on sapphire (11–20), *Journal of Materials Research*, 2023, vol. 38. issue 2, pp. 429-438. DOI: 10.1557/s43578-022-00828-3.
10. Devitsky O.V., Kravtsov A.A., Sysoev I.A. Issledovanie sostava plenok GaAs_{1-y}Bi_y, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo napyleniya [Study of the composition of GaAs_{1-y}Bi_y films obtained by pulsed laser deposition], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 96-105. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.096. (In Russian).
11. Devitsky O.V. Struktura i sostav tonkikh plenok GaAs_{1-x-y}N_xBi_y, poluchennykh metodom impul'snogo lazernogo napyleniya [Structure and composition of thin GaAs_{1-x-y}N_xBi_y films produced by pulsed laser deposition], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 593-601. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.593. (In Russian).
12. Devitsky O. V., Nikulin D.A., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of gallium nitride thin films on sapphire substrates, *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2313, pp. 030012-1-030012-5. DOI: 10.1063/5.0032227.
13. Rout S., Popovici N., Dalui S. et al. Phase growth control in low temperature PLD Co: TiO₂ films by pressure, *Current Applied Physics*, 2013, vol. 13, issue 4, pp. 670-676. DOI: 10.1016/j.cap.2012.11.005.
14. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S. et al. Growth of nanotextured thin films of GaInAsP and GaInAsSbBi solid solutions on GaP substrates by pulsed laser deposition, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2023, vol. 14, issue 5, pp. 601-605. DOI: 10.17586/2220-8054-2023-14-5-601-605.
15. García D.M.A., Santos R.D., Liu L., Nunes W.C. Exploring morphological variation in bismuth ferrite nanostructures by pulsed laser deposition: synthesis, structural and electrochemical properties, *Nanotechnology*, 2024, vol. 35, issue 23, pp. 235702-1-235702-8. DOI: 10.1088/1361-6528/ad2ee1.
16. Luo J., Wang W., Zheng Y. et al. AlN/nitrided sapphire and AlN/non-nitrided sapphire hetero-structures epitaxially grown by pulsed laser deposition: A comparative study, *Vacuum*, 2017, vol. 143, pp. 241-244. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.06.012.
17. Palla-Papavlu A., Dinca V., Ion V. et al. Characterization of polymer thin films obtained by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, issue 12, pp. 5303-5307. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.140.
18. Socol M., Preda N., Socol G. Organic thin films deposited by matrix-assisted pulsed laser evaporation (MAPLE) for photovoltaic cell applications: A review, *Coatings*, 2021, vol. 11, issue 11, art. no. 1368, 32 p. DOI: 10.3390/coatings11111368.
19. Hopp B., Smausz T., Kecskeméti G. et al. Femtosecond pulsed laser deposition of biological and biocompatible thin layers, *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, issue 19, pp. 7806-7809. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.102.
20. Harris S.B., Rouleau C.M., Xiao K., Vasudevan R.K. Deep learning with plasma plume image sequences for anomaly detection and prediction of growth kinetics during pulsed laser deposition, *npj Computational Materials*, 2024, vol. 10, issue 1, art. no. 105, 8 p. DOI: 10.1038/s41524-024-01275-w.
21. Anyanwu V.O., Moodley M.K. PLD of transparent and conductive AZO thin films, *Ceramics International*, 2023, vol. 49, issue 3, pp. 5311-5318. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.10.054.
22. Smith, H.M., Turner, A.F. Vacuum deposited thin films using a ruby laser, *Applied Optics*, 1965, vol. 4, issue 1, pp. 147-148. DOI: 10.1364/ao.4.000147.
23. Sheftal R.N., Cherbakov I. V. Mechanism of condensation of heteroepitaxial A³B⁵ layers pulse of moderate power, *Crystal Research and Technology*, 1981, vol. 16, issue 8, pp. 887-891. DOI: 10.1002/crat.19810160805.
24. Chowdhury F.R., Gupta M., Tsui Y.Y. Nanocrystalline GaAs thin films by pulsed laser deposition, *Proceedings of SPIE, Photonics North 2012*, 6-8 June 2012, Montréal, Canada, ed. by J.-C. Kieffer. Bellingham, WA, SPIE Publ., 2012, vol. 8412, pp. 84121U-1-84121U-7. DOI: 10.1117/12.2001471.
25. Li S., Lin Z., Hu W. et al. Exploration of growth conditions of TaAs Weyl semimetal thin film using pulsed laser deposition, *Chinese Physics B*, 2023, vol. 32, issue 4, art. no. 047103, 9 p. DOI: 10.1088/1674-1056/acb913.

26. Nguyen Van T., Laborde E., Champeaux C. et al. Tunability of optical properties of InSb films developed by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science*, 2023, vol. 619, art. no. 156756, 12 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.156756.
27. Tang P., Li B., Feng L. et al. Structural, electrical and optical properties of AlSb thin films deposited by pulsed laser deposition, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 692, pp. 22-25. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.016.
28. Tang P., Wang W., Li B. et al. The properties of Zn-doped AlSb thin films prepared by pulsed laser deposition, *Coatings*, 2019, vol. 9, issue 2, art. no. 136, 9 p. DOI: 10.3390/coatings9020136.
29. Yimam D.T., Zhang H., Momand J., Kooi B.J. Pulsed laser deposited stoichiometric GaSb films for optoelectronic and phase change memory applications, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, vol. 133, art. no. 105965, 9 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105965.
30. Hafez M.A., Elamrawi K.A., Elsayed-Ali H.E. Pulsed laser deposition of InP thin films on sapphire (100) and GaAs (100), *Applied Surface Science*, 2004, vol. 233, issue 1-4, pp. 42-50. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.02.066.
31. Iribarren A., Castro-Rodríguez R., Ponce-Cabrera L., Peña J.L. Growth of polycrystalline InP thin films by the pulsed laser deposition technique, *Thin Solid Films*, 2006, vol. 510, issue 1-2, pp. 134-137. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.12.302.
32. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S. et al. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 2022, vol. 743, art. no. 139064, 8 p. DOI: 10.1016/J.TSF.2021.139064.
33. Pashchenko A.S., Devitsky O. V., Lunina M.L. et al. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition, *Vacuum*, 2024, vol. 227, art. no. 113372, 9 p. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.

Review

Pulsed laser deposition OF III-V semiconductor thin films: review

O.V. Devitsky^{1,2}

¹*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia*

²*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.621

Abstract: This review highlights the latest advancements in pulsed laser deposition of III-V semiconductor thin films on various substrates. The pulsed laser deposition method is shown to be highly effective and distinct from other thin film deposition techniques due to its discrete nature. Epitaxial growth of III-V thin films is crucial for developing new optoelectronic devices. The review presents experimental data on how various pulsed laser deposition parameters affect the structural, optical, and electrical properties as well as the stoichiometry of binary and multicomponent III-V thin films. It is demonstrated that achieving the highest structural quality in III-V thin films requires using femtosecond and nanosecond lasers with wavelengths ranging from 248 nm to 532 nm, a pulse energy density of no more than 3 J/cm², and substrate temperatures between 300 and 400°C. Additionally, the target material should be monolithic and have the highest possible density.

Keywords: *pulsed laser deposition, thin films, III-V compounds, substrate temperature, energy density, stoichiometry.*

Девицкий Олег Васильевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»; старший научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

Oleg V. Devitsky – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology North Caucasus Federal University.

Поступила в редакцию/received: 05.08.2024; после рецензирования/revised: 03.09.2024; принята/accepted 04.09.2024.