БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Scaling the MOS Transistor Below 0,1 μm: Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna [et al.] // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, No 6. – P. 941–951.
2. Iwai, H. Technology toward low power / low voltage and scaling of MOSFETs / H. Iwai, H. S. Momose // Microelectron. Engineer. – 1997. – Vol. 39, No 1. – P. 7–30.
3. Electronic properties of two-dimensional systems / T. Ando, A. B. Fowler and F. Stern // Rev. Mod. Phys. – 1982. – Vol. 54. – P. 437–672.
4. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]; БГУ. – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕДЬЮ ИЗ ЛАТУНИ, НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА

А. П. Зажогин, М. П. Патапович, Н. Х. Чинь

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: zajogin_an@mail.ru

Для установления условий влияния между импульсного интервала на процессы целенаправленного формирование компонентного и зарядового состава приповерхностной лазерной плазмы при лазерной абляции латуни проведены исследования ее методом лазерной искровой спектрометрии (ЛИС). Изучены возможности получения пленок оксидов цинка легированных медью, с достаточно хорошими механическими характеристиками, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами мишени из латуни, установленной на расстояниях 3 мм под углом 45° к подложке в воздушной атмосфере.

Ключевые слова: ZnO; импульсное лазерное осаждение; лазерная искровая спектрометрия; сдвоенные лазерные импульсы; пленки оксида цинка; приповерхностная лазерная плазма.

SPECTRAL STUDIES OF THE PROCESSES ON DEPOSITION OF THIN FILMS OF ZINC OXIDES, DOPED WITH COPPER FROM BRASS, ON GLASS SURFACE USING DOUBLE LASER PULSES AT THE ATMOSPHERIC AIR PRESSURE

A. P. Zajogin, M. P. Patapovich, N. H. Trinh

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. P. Zajogin (zajogin_an@mail.ru)

To establish the effects of interpulse time on the processes of intentional forming the component and charge composition of the surface laser plasma during laser ablation of brass, it has been studied by the laser spark spectrometry (LSS) method. The possibilities for the formation of the copper-doped zinc oxide films featuring good mechanical proper-

ties have been investigated with ablation in the air by double laser pulses of the copper target positioned at a distance of 3 mm at angle of 45° with respect to the substrate.

Key words: ZnO; pulsed laser deposition; zinc oxide films; surface laser plasma; laser spark spectrometry; double laser pulses.

ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка является многофункциональным полупроводниковым материалом и привлекает внимание исследователей в связи с обширной сферой возможных применений. Материалы на основе ZnO могут быть использованы в качестве компонентов газовых сенсоров, катализаторов, люминесцентных материалов, светоизлучающих диодов и др. Особые надежды связаны с возможностью создания на основе ZnO ферромагнитных полупроводников с высокой температурой Кюри. Оксид цинка - уникальный функциональный полупроводниковый материал с большой шириной запрещенной зоны (3.37 эВ), *n*-типом проводимости и большой энергией связи экситонов (60 мэВ) при комнатной температуре [1]. Тонкие слои оксида цинка создаются с помощью как физических, так и химических методов [2-4]). Для улучшения его характеристик модифицируют свойства поверхности путем энергетических воздействий, легирования или модификации процесса изготовления. Легирование оксида цинка различными элементами позволяет расширить его функциональные свойства.

Определено, что алюминий, медь и галлий являются наиболее подходящими добавками для легирования тонких пленок оксида цинка *n*-типа электропроводности [2–9]. При этом легирующие добавки меди [2, 7–9] и галлия [2] являются наиболее эффективными. Медь обычно проявляет акцепторные свойства, в то время как галлий, легирующая добавка *n*-типа, является донором, что позволяет управлять газочувствительностью ZnO, изменяя объемные свойства материала. Вследствие этого многие исследователи изучают сенсорные свойства структур, легированных Cu и Ga.

Изучение способов формирования стабильных наноструктур имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Техника импульсного лазерного напыления является одним из основных инструментов современных нанотехнологий, расширяющая круг материалов, позволяющих совершенствовать устройства квантовой электроники. К достоинствам импульсного лазерного напыления как метода получения кластеров, фракталов относятся его универсальность по отношению к материалу, возможность практически исключить наличие посторонних примесей, гибкость метода и возможность контроля в процессе роста пленочных структур [1-4]. Благодаря высокой энергии частиц в лазерной плазме, температура кристаллизации пленок оказывается ниже по сравнению с другими методами и существенно упрощается технология введения легирующих добавок.

Естественно, что развитие технологии импульсного лазерного напыления невозможно без модернизации используемых и разработки новых методик. Большое практическое значение для практики имеют физические способы получения многокомпонентных порошков, при которых образование частиц происходит в неравновесных условиях, например, воздействуя сдвоенными лазерными импульсами (высокое давление и температура) на сплавы, содержащие в себе различные соединения металлов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа [10], контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управления составом плазмы [11–12], направляемой на подложку. Двухимпульсный характер метода дает более высокую плотность частиц в факеле и степень ионизации, что позволяет равномернее напылять пленки малых толщин. Высокая скорость частиц позволяет повысить предел растворимости трудно растворимых компонент в ZnO.

Разрабатываемый в данной работе подход основан на использовании высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов для распыления (абляции) мишеней, содержащих необходимые металлы.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Спектрометр включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика напыления на поверхность стекла наночастиц оксидов цинка исследована при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на мишень из латуни, установленную под углом 45 градусов к падающему излучению и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия каждого импульса излучения ≈ 35 мДж, а временной интервал между импульсами от 0 до 20 мкс.

Одна из основных проблем в экспериментах по осаждению кластеров на поверхность - это дальнейшая судьба кластеров. При этом частицы сразу после падения на поверхность могут фрагментировать или частично проникать в глубь этой поверхности, а в дальнейшем диффундировать по поверхности и образовывать агрегации кластеров или кластерных фрагментов.

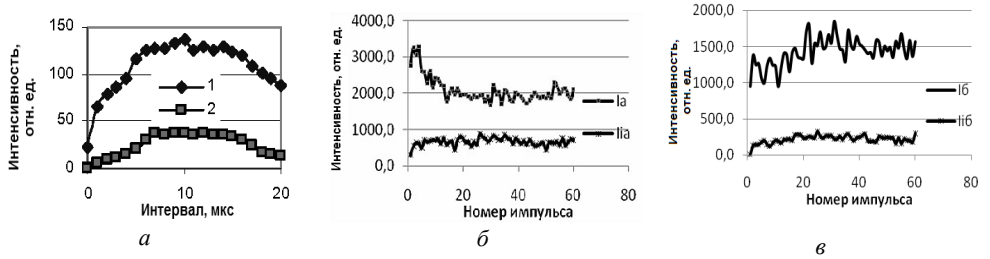

Рисунок 1. – *а* – интенсивность атомной Zn I (468,014 нм) и ионной Zn II (492,404 нм) линий (1 и 2 соответственно), *б* - чистый цинк (Ia и IIa), *в* – цинк в латуни ЛС 59 (Iб и IIб)

Исследования процессов напыления от интервала между импульсами показали, что при интервалах от 0 до 6 мкс цинк распыляется, но напыления пленки практически не наблюдается. С увеличением интервала наблюдается заметный рост пленки, особенно заметный в интервалах от 8 до 15 мкс. При дальнейшем увеличении интервала качество пленки существенно ухудшается. Проведенные параллельно спектральные исследования зарядового состава компонент приповерхностной плазмы

показали, что в этом интервале интенсивность ионной линии цинка Zn II (492,404 нм) существенно увеличивается, что способствует ускорению процессов образования оксидов цинка (см. рис. 1, *а*). На рис. 1, *б* и 1, *в* приведены интенсивность линий от номера импульса при воздействии на чистый цинк и латунь серией сдвоенных импульсов (интервал между импульсами 10 мкс) равной 60 импульсов.

При сравнении полученных результатов наблюдается определенная разница в поведении атомной линий в чистом цинке и латуни.

Изображения поверхности стекла с нанесенными пленками, увеличенные с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4 в 300 раз, приведены на рис. 2, *а* и *2, в*. Пленки получены при воздействии сдвоенными лазерными импульсами на мишень из латуни, установленной на расстояниях 3 мм под углом 45° к подложке в воздушной атмосфере.

а

б

Рисунок 2. – Изображение поверхности стекла после напыления цинка и меди сдвоенными лазерными импульсами: *а* – 300 импульсов и *б* – 1000 импульсов на полированную поверхности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, воздействие на мишень второго лазерного импульса с временным сдвигом 8–15 мкс относительно первого, приводит к существенному увеличению поступления вещества в плазму и на поверхность стекла.

На примере синтеза тонкопленочных металлических покрытий показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения (торможение осаждаемых частиц, внедрение атмосферных газов в объем пленки).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Jagadish, C. Zink Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures. / eds C. Jagadish, S. J. Pearton. - Amsterdam, Elsevier, 2006. - 589 p.
2. Крастева, Л.К. Синтез и характеризация наноструктурированных слоев оксида цинка для сенсорики. /Л.К. Крастева, Д.Ц. Димитров, К.И. Папазова, Н.К. Николаев, Т.В. Пешкова, В.А. Мошников, И.Е. Грачева, С.С. Карпова, Н.В. Канева. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 4. – С.564-569.
3. Shukla, G. ZnO/MgZnO p–n junction light-emitting diodes fabricated on sapphire substrates by pulsed laser deposition technique. // J. Phys. D Appl. Phys. – 2009.- V.42. - P.75-105.
4. Urban, B. E. Optimization of nonlinear optical properties of ZnO micro and nanocrystals for biophotonics. /B. E. Urban, J. Lin, O. Kumar, K. Senthilkumar, Y. Fujita, and A. Neogi.// Opt. Mater. Express. – 2011. – V. 1. P. 658–669.

5. Agura, H. Low resistivity transparent conducting Al-doped ZnO films prepared by pulsed laser deposition. / A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, M. Okuda. // Thin Solid Films. – 2003. - V.445. – P. 263-267.
6. Peng, X. Structural and PL properties of Cu-doped ZnO films,"/ X. Peng, J. Xu, H. Zang, B. Wang, and Z. Wang. // J. Lumin. – 2008. – V. 128. - 297–300.
7. Yan, Y. Doping of ZnO by group-IB elements," / Y. Yan, M. M. Al-Jassim, and S. H. Wei. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 89(18). – P. 181912.
8. Ma, L. Microstructures and optical properties of Cu-doped ZnO films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering," / L. Ma, S. Ma, H. Chen, X. Ai, and X. Huang. //Appl. Surf. Sci. – 2011. – V.257. - P. 10036–10041.
9. Li, F. M. Effects of the oxygen partial pressure and annealing atmospheres on the microstructures and optical properties of Cu-doped ZnO films," / L. T. Bo, S. Y. Ma, X. L. Huang, L. G. Ma, J. Liu, X. L. Zhang, F. C. Yang, and Q. Zhao. // Superlattices Microstruct. – 2012. – V. 51. - P. 332–342.
10. Сухов, Л.Т. Лазерный спектральный анализ. / Л.Т. Сухов. - Новосибирск. 1990. – 143 с.
11. Жерихин, А.Н. Лазерное напыление тонких пленок. / А.Н. Жерихин. //Итоги науки и техники. Се-рия: Проблемы лазерной физики. - М. ВИНИТИ. 1990. - 107 с.
12. Анисимов, С.И. Избранные задачи теории лазерной абляции. / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук. //УФН. - 2002. - Т.172, №3. – С.301-333.
13. Dietl, T. Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors. / T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert and D. Ferrand. // Science. – 2000. – V. 287. – P. 1019-1022.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КАНАЛА НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ AlN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЕВУЮ МИШЕНЬ СЕРИЯМИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, В. В. Лычковский

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: zajogin_an@mail.ru

Исследованы процессы образования микроканалов при воздействии серий последовательных сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показана возможность увеличения как доли нанокластеров нитрида алюминия (AlN), так и ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме в режимах абляции в зависимости от формы образующегося микроканала

Ключевые слова: AlN; импульсное лазерное напыление; приповерхностная лазерная плазма; лазерная искровая спектрометрия; многозарядные ионы; одиночные и сдвоенные лазерные импульсы.

INFLUENCE OF THE CHANNEL FORM ON THE AlN FORMATION PROCESSES WHEN ALUMINUM TARGET IS SUBJECTED TO A SERIES OF DOUBLE LASER PULSES

Kh. Bazzal, E. S. Voropay, A. P. Zajogin, V. V. Lichkovskyi

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. P. Zajogin (zajogin_an@mail.ru)