

УДК 53.082.53

doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-31-39

Анализ разрушающих методов измерения и контроля толщины тонких пленок

А.Е. Шупенев, Н.С. Панкова, И.С. Коршунов, А.Г. Григорьянц

МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Analysis of Destructive Methods of Thin Films Thickness Measurement

A.E. Shupenev, N.S. Pankova, I.S. Korshunov, A.G. Grigoryants

Bauman Moscow State Technical University

Технологии получения тонких пленок, нашедшие широкое применение в науке и технике, являются критически важными в оптической и электронной отраслях промышленности. Особые свойства тонких пленок в первую очередь обусловлены их толщиной, находящейся в диапазоне от 1 нм до 1 мкм. Измерение такой толщины — ответственная задача, всегда сопутствующая этапу отработки тонкопленочной технологии. При использовании образцов-свидетелей или дополнительных контрольных групп образцов применимы разрушающие методы измерения толщины осажденных слоев. Проведен анализ самых распространенных методов разрушающего контроля и измерения толщины тонких пленок, результаты которого могут послужить основой для выбора наиболее подходящего метода при планировании соответствующих исследований. Рассмотрены отличительные особенности методов косого и сферического шлифов, стилусной профилометрии и атомно-силовой микроскопии для измерения толщины тонких пленок.

Ключевые слова: толщина тонких пленок, метод косого шлифа, метод сферического шлифа, стилусная профилометрия, атомно-силовая микроскопия

Thin film technologies are widely used in science and industry and have a critical value for optics and electronics. Special properties of thin films are related to their thickness, usually ranging between 1 nm and 1 μ m. Measuring such a thickness is a challenging task, always concomitant with the stage of technology development. When using witness samples and specimen control groups, destructive methods can be employed to measure the thickness of the deposited layers. An analysis of the most commonly used destructive methods of measuring the thickness of thin films is conducted, the results of which can be used for selecting a suitable method when planning corresponding experiments. This work describes theoretical and practical considerations of using bevel cut method, spherical cut method, atomic force microscopy and stylus profilometry for measuring thin film thickness.

Keywords: thin films thickness, bevel cut method, spherical cut method, stylus profilometry, atomic-force microscopy

Контроль толщины тонких пленок (ТП) вне реакционной камеры их роста применяют по разным причинам. Например, если невозможно использовать метод *in situ* или необходима верификация результата, полученного измерением в реакционной камере роста ТП. В отличие

от методов *in situ* контроль толщины *ex situ* может носить как разрушающий, так и неразрушающий характер. В большинстве случаев разрушающие методы предполагают применение либо контрольных модулей на рабочей подложке, либо специальных образцов-свиде-

телей (контрольных образцов), обрабатываемых вместе с рабочими подложками и служащих только для контроля [1]. Следовательно, по отношению к контролируемой (рабочей) ТП такие методы будут являться неразрушающими, а значит, трудно говорить о строгой классификации методов *ex situ*.

Цель работы — анализ теоретических и практических особенностей наиболее используемых методов разрушающего контроля и измерения толщины ТП, получаемых методами физического осаждения в вакууме.

В данной статье приведено традиционно сложившееся деление методов на разрушающие и неразрушающие. Следует также иметь в виду, что один и тот же метод для ТП разного типа может быть как разрушающим, так и неразрушающим.

Метод косо́го шлифа (среза). Существует практика определения толщины ТП (более 1 мкм) с помощью микроскопических измерений перпендикулярного поперечного скола. Для измерения более тонких пленок также можно использовать микроскоп, но при этом нужно «растянуть» толщину ТП, в чем и состоит суть метода косо́го шлифа (среза).

Пленку вместе с подложкой сошлифовывают с торца или скалывают под небольшим углом $\alpha = 0,5 \dots 5,0^\circ$ [2]. На рис. 1, а показан образец, установленный в оправку из нержавеющей стали до и после механической обработки. На рис. 1, б приведена расчетная схема для определения толщины ТП d_1 и подложки d_2 на основе

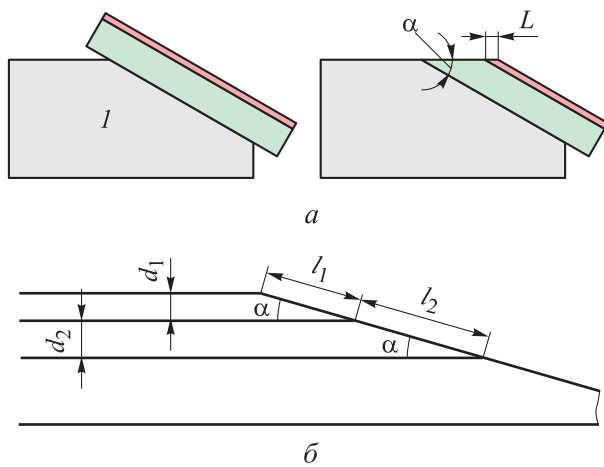


Рис. 1. К выполнению косо́го шлифа: а и б — схемы образца, установленного в оправку из нержавеющей стали до и после механической обработки (1 — оправка); в — расчетная схема для определения толщины ТП

наблюдаемых в фокальной плоскости микроскопа линейных размеров участков ТП l_1 и подложки l_2 . При этом необходимо иметь в виду, что механическими способами (такими как шлифовка и полировка алмазной пастой) удается получить угол скоса до 1° , что не удовлетворяет требованиям к измерению ТП. В этом случае прибегают к химическому травлению, с помощью которого делают косые шлифы с углом скоса до нескольких минут и даже секунд [1]. Также следует отметить, что современное оборудование позволяет выполнять шлифы толщиной до 20 нм [3].

Если слои трудноразличимы, то изготовленный шлиф окрашивают специальными травителями [1], после чего измеряют линейный размер L соответствующего слоя. При использовании оптического микроскопа с иммерсионными средствами наилучшим разрешением является 0,2 мкм. С помощью растрового электронного микроскопа можно определить толщину бокового среза пленки с точностью до нескольких нанометров [3].

Искомую толщину слоя находят по выражению

$$d = L \sin \alpha.$$

Достоинства метода: простота, доступность, возможность измерения ТП любого типа (при условии четкого выявления границы между слоями или слой–подложка), а также определения толщины ТП с высокой точностью (с применением растрового электронного микроскопа) [3].

Недостатки метода: разрушающий характер, сложность получения информации об однородности толщины ТП, невозможность применения для подложек, не поддающихся шлифованию (например, гибких полиимидных), необходимость достаточно высокой разрешающей способности оптического оборудования [2].

Метод сферического шлифа. Этот метод секционирования подразумевает изготовление сферического шлифа в виде лунки в исследуемом образце (рис. 2) [2] с помощью металлического шара диаметром 30...150 мм, абразивной суспензии из алмазной пасты и часового масла [1, 2].

Как и в предыдущем методе, при необходимости контрастируют окраску измеряемых слоев специальными окрашивающими растворами

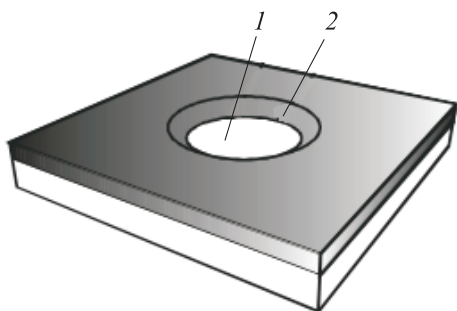


Рис. 2. Внешний вид сферического шлифа:
1 — подложка; 2 — пленка

ми [1]. Затем, используя микроскоп, определяют толщину слоя двумя способами.

Первый способ (рис. 3, а) основан на измерении диаметра лунки D_1 и диаметра вписанной концентрической окружности D_2 , соответствующей границе раздела контролируемого слоя с последующим слоем (или подложкой). На основании полученных данных вычисляют толщину слоя по формуле

$$d = \frac{D_1^2 - D_2^2}{4D}$$

где D — диаметр сферического шлифа.

Второй способ заключается в измерении длины хорды H , касательной к границе раздела и ограниченной окружностью, образованной либо границей раздела с верхним слоем (в многослойных структурах), либо границей выхода шлифа на поверхность структуры (рис. 3, б) [2]. Толщину измеряемого слоя определяют по выражению

$$d = \frac{H^2}{8R}$$

где R — радиус сферического шлифа [2].

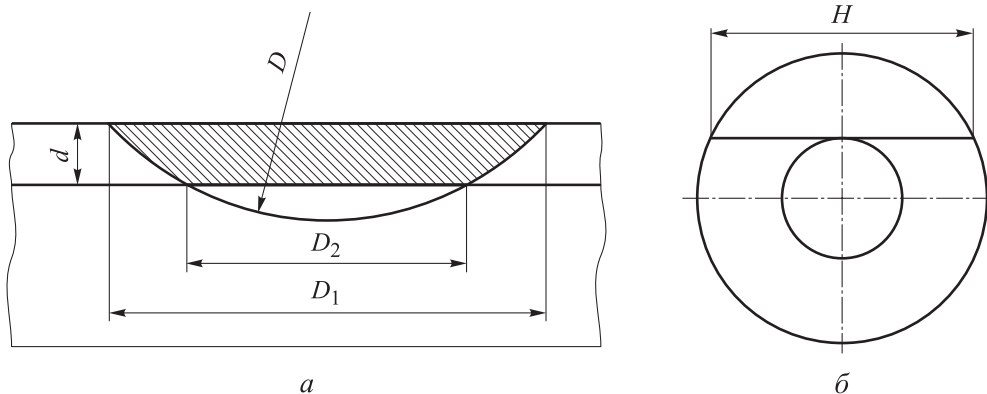


Рис. 3. Схемы сферического шлифа для определения диаметров D_1 и D_2 (а) и длины хорды H (б)

Описанный метод применим для контроля слоев толщиной более 0,1 мкм [2].

Достоинства метода: простота, доступность, дешевизна, отсутствие необходимости измерения углов среза, простота получения информации об однородности толщины слоя, использование в качестве одного из промышленных методов контроля толщины [2].

Недостатки метода: разрушающий характер, высокая длительность единичного измерения [2], возможность возникновения погрешностей вследствие несферичности лунки шлифа [2].

Профилометрия (стилусная). Данный метод используют при исследовании морфологии пленок: для оценки параметров поверхности (таких как шероховатость и наличие макрочастиц) и измерения толщины ТП [4]. По принципу действия профилометры подразделяют на контактные (стилусные) и оптические (интерференционные) [5, 6].

Рассмотрим стилусную профилометрию, основанную на механическом исследовании профиля поверхности подложки [1]. Принцип действия контактных профилометров состоит в следующем. Вследствие перемещения по неровной поверхности исследуемого объекта алмазный стилус претерпевает механические колебания в вертикальной плоскости (рис. 4). Эти колебания являются первичным сигналом, который с помощью преобразователя (индуктивного, емкостного и т. д.) преобразуется в электрический сигнал. Электрический сигнал поступает на электронный усилитель (гальванометр), интегрируется и визуализируется [7]. Современные профилометры оснащены программным обеспечением, позволяющим воспроизводить результаты измерения в удобном и

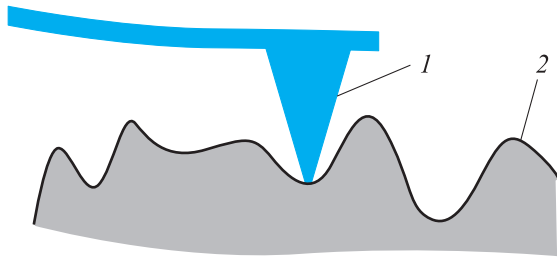


Рис. 4. Схема перемещения стилуса по поверхности образца:
1 — стилус; 2 — поверхность

не требующем расшифровки виде. Обычно рельеф поверхности представляется дву- или трехмерной картинкой [5].

Определение толщины ТП методом контактной профилометрии заключается в измерении высоты ступени, образованной пленкой и подложкой. Ступень получают удалением части ТП с подложки или маскированием участка подложки при напылении.

Стилусную профилометрию традиционно относят к разрушающим методам, так как в ходе измерения острые иглы может проникать в глубь пленки и повреждать ее. Особенно сильно подвержены повреждению ТП с низкой твердостью. Однако производители современных профилометров обещают контролируемое усилие воздействия на иглу в диапазоне 0,03...10,00 мН [8], что снижает вероятность повреждения ТП.

Отличительной особенностью стилусной профилометрии является то, что толщину слоя определяют в заданной точке, а не получают средний результат по всей площади подложки, как, например, в гравиметрическом методе. Кроме того, современные профилометры позволяют сканировать участок длиной 200 мкм [9]. Все это в совокупности дает возможность быстро и точно построить профиль распределения толщины ТП по подложке [10].

Использование такого метода для измерения толщины ТП ограничено диапазоном вертикального перемещения стилуса. Однако обзор существующих контактных профилометров показал, что подбор подходящего прибора не должен вызывать трудности, так как существуют профилометры с различным верхним пределом диапазона вертикального перемещения (например, 300 [9], 800 и 1200 мкм [8]). В качестве примера применения рассматриваемого метода можно привести работу [11], где толщину ТП измеряли профилометром Alpha Step 500 компании Tencor.

Достоинства метода: простота измерения и интерпретации результатов, высокая точность измерения толщины ТП (от ± 5 до ± 10 нм) [10], широкий диапазон вертикального перемещения стилуса (что позволяет измерять ТП различной толщины), возможность получения профиля распределения толщины ТП по подложке, отсутствие влияния различных свойств исследуемого слоя (оптических, электрических и т. д.) на точность измерения толщины ТП, т. е. измеряется ее истинная (геометрическая) величина [12].

Недостатки метода: необходимость четкой ступени длиной порядка 100 мкм [4] и высокая вероятность повреждения ТП малой твердости.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ является одним из видов сканирующей зондовой микроскопии, относящихся к широкому классу современных методов исследования поверхности твердых тел.

Принцип работы атомно-силового микроскопа (иногда называемого сканирующим силовым микроскопом) основан на силовом взаимодействии зонда и поверхности исследуемого образца. В большинстве случаев такое взаимодействие связывают лишь с возникновением ван-дер-ваальсовых сил между крайними атомами зонда и образца.

Однако в работах [13, 14] показано, что в зависимости от свойств поверхности, зонда и условий, в которых проводят исследования, необходимо учитывать упругие силы при механическом контакте и капиллярные силы, связанные с наличием пленки адсорбата (воды) на поверхности образца.

Работу атомно-силового микроскопа можно описать с помощью упрощенной кинематической схемы [14], приведенной на рис. 5.

Основным чувствительным элементом (датчиком силы) является микроскопическая упругая балка (левер или кантилевер), на свободном конце которой закреплена сверхострая игла (зонд), заканчивающаяся практически отдельным атомом. В зависимости от необходимой жесткости кантилевер выполняют в виде консоли с прямоугольным сечением или треугольника. В ходе сканирования игла огибает профиль образца, перемещаемого посредством пьезоманипулятора (пьезосканера).

Сканирование поверхности происходит небольшими шагами (точечно) вдоль линии. В каждой точке скана вертикальное отклонение

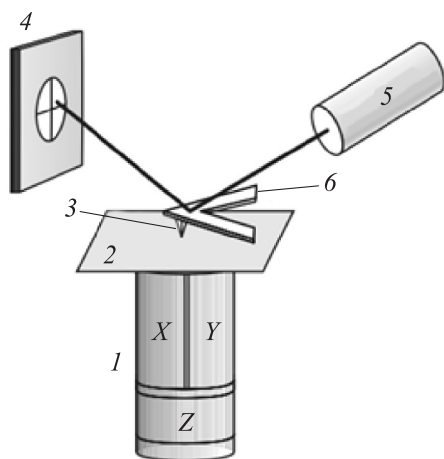


Рис. 5. Кинематическая схема АСМ:
1 — пьезоманипулятор; 2 — образец; 3 — зонд;
4 — фотодиод; 5 — лазер; 6 — леввер

кантилевера детектируется оптическим датчиком. Излучателем обычно служит полупроводниковый лазер, а позиционно-чувствительным фотоприемником — четырехсекционный полупроводниковый фотодиод. Оптическую систему АСМ юстируют так, чтобы излучение фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок лазера падал в центр фотоприемника. В процессе сканирования происходит отклонение кантилевера, которое измеряется благодаря фиксации изменения положения (от юстированного) отраженного луча лазера [13–17].

По способу измерения и фиксации силового взаимодействия зонда и образца различают следующие режимы работы АСМ: контактный квазистатический и резонансные — прерывисто-контактный, полуконтактный, неконтактный и бесконтактный [14, 18]. В контактном режиме сканирования кончик острия находится в мягком физическом контакте с поверхностью образца, благодаря чему возможны поломки зондов и повреждения исследуемой поверхности.

В связи с этим самым распространенным режимом сканирования является полуконтактный. В этом режиме зонд кантилевера приближается к поверхности на такое расстояние, чтобы касаться ее в каждом цикле своих колебаний. Таким образом, в полуконтактном режиме зонд колеблется на резонансной частоте и обстукивает исследуемую поверхность. При этом, уменьшая механический контакт, можно значительно увеличить срок службы зондов. В бесконтактном режиме острие не касается поверх-

ности, взаимодействуя с ней посредством дальнедействующих сил. Поэтому такой режим используют преимущественно в сверхвысоковакуумных условиях. Достоинства и недостатки режимов работы АСМ приведены в публикациях [13, 19, 20].

Определение толщины ТП методом АСМ заключается в измерении перепада высот между напыленной пленкой и подложкой. В работе [21] отмечена важность наличия резкой ступеньки на границе пленка–подложка, без переходных областей, размеры которых могут достигать десятков или сотен микрометров, что существенно ограничивает применение АСМ для измерения толщины ТП.

На практике для оценки толщины нанесенного слоя часто используют разрушающий метод создания ступени: на поверхность подложки с пленкой с помощью острого инструмента наносят царапину. При этом твердость режущей кромки инструмента должна быть выше, чем у исследуемой пленки, но ниже, чем у подложки. Затем атомно-силовым микроскопом сканируют профиль полученного углубления в пленке и с помощью профилограммы АСМ-изображения выявленной границы пленка–подложка по перепаду высот находят толщину ТП [22].

Достоинства метода: широкий спектр режимов работы, высокая разрешающая способность (5...10 нм) [23], простота измерения и интерпретации результатов, а также возможность исследования объектов, непроводящих электрический ток (например, биологических) [20]. К преимуществам АСМ перед другими методами можно отнести и тот факт, что толщину напыленного слоя измеряют на локальном участке поверхности. При проведении серии точечных измерений можно получить профиль распределения толщины ТП по площади подложки.

Недостатки метода: необходимость наличия резкой ступени, низкая скорость измерения, высокая стоимость оборудования, влияние на достоверность результатов условий среды, в которой проводят измерения [14], большое количество артефактов в получаемых топографических изображениях [23, 24].

Выводы

1. Неразрушающие методы контроля и измерения толщины ТП используют как на этапах

проведения поисковых исследовательских работ, так и в условиях организованного производства. Выбор подходящего разрушающего метода измерения толщины ТП зависит от типа пленки, ее назначения, толщины, физических характеристик (оптических свойств, шероховатости, твердости и т. д.) и требуемой точности.

2. В случае необходимости восстановления сложной закрытой топологии (например, при реверс-инжиниринге) целесообразно применять метод косого шлифа, так как с его помощью можно исследовать структуру послойно.

3. Атомно-силовая микроскопия, являющаяся одним из самых универсальных методов, сочетает нанометровое разрешение измерения с низкой трудоемкостью подготовки образцов, а также с возможностью анализа морфологии поверхности исследуемых пленок.

4. Метод профилометрии целесообразно использовать при измерении толщины пленок, составляющей сотни нанометров, а также при оперативной оценке распределения толщины вдоль относительно длинной (до 200 мм) поверхности.

Литература

- [1] Майссел Л., Глэнг Р. *Технология тонких пленок (справочник)*. Т. 2. Москва, Советское радио, 1977. 768 с.
- [2] Шерченков А.А., Штерн Ю.И. *Материалы электронной техники: Лабораторный практикум*. Ч. 3. Москва, МИЭТ, 2004. 86 с.
- [3] Антоненко С.В. *Технология тонких пленок*. Москва, МИФИ, 2008. 104 с.
- [4] *Handbook of thin film deposition*. Ed. Seshan K., Schepis D. William Andrew, 2018. 470 p.
- [5] Venables J.A., Spiller G.D.T., Hanbucken M. Nucleation and growth of thin films. *Reports on progress in physics*, 1984, vol. 47, no. 4, pp. 399–459, doi: 10.1088/0034-4885/47/4/002
- [6] Орешкин О.М. *Разработка системы непрерывного контроля шероховатости поверхности для повышения эффективности технологии лазерного полирования авиационных деталей*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 134 с.
- [7] Lee B.S., Strand T.C. Profilometry with a coherence scanning microscope. *Applied optics*, 1990, vol. 29, no. 26, pp. 3784–3788, doi: 10.1364/AO.29.003784
- [8] Su X., Chen W. Fourier transform profilometry: a review. *Optics and lasers in Engineering*, 2001, vol. 35, no. 5, pp. 263–284, doi: 10.1016/S0143-8166(01)00023-9
- [9] Wang Z., Nguyen D.A., Barnes J.C. Some practical considerations in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 218–225, doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.06.005
- [10] Хасс Г., Тун Р.Э., ред. *Физика тонких пленок. Т. 3. Современное состояние исследований и технические применения*. Москва, Мир, 1968. 331 с.
- [11] Новодворский О.А., Храмова О.Д., Венцель К., Барта Й.В. Размерные эффекты статической проводимости в тонких пленках тантала. *Журнал технической физики*, 2005, т. 75, № 6, с. 42–45.
- [12] Метфессель С. *Тонкие пленки, их изготовление и измерение*. Москва, Ленинград, Госэнергоиздат, 1963. 272 с.
- [13] Сергеев А.Г. *Введение в нанометрологию*. Владимир, Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 296 с.
- [14] Галлямов М.О. *Сканирующая зондовая микроскопия нуклеиновых кислот и тонких органических пленок*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 1999. 227 с.
- [15] Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А. *Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля*. Москва, Физматлит, 2012. 648 с.
- [16] Smith D.L. *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. McGraw-Hill Education, 1995. 616 p.
- [17] Eaton P., West P. *Atomic force microscopy*. Oxford, Oxford University Press, 2010. 248 p.
- [18] Kats M.A., Blanchard R., Genevet P., Capasso F. Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media. *Nature materials*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 20–24, doi: 10.1038/nmat3443
- [19] Rugar D. Atomic force microscopy. *Physics today*, 1990, vol. 43, no. 10, pp. 23–30, doi: 10.1063/1.881238

- [20] Асеев А.Л., ред. *Нанотехнологии в полупроводниковой электронике*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
- [21] Morita S., Giessibl F.J., Meyer E., Wiesendanger R. *Noncontact atomic force microscopy*. Vol. 3. Springer, 2015. 539 p.
- [22] Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Авачев А.П., Шилин А.В. Диагностика тонкопленочных микро- и наноструктур на основе неупорядоченных полупроводников. *Диагностика наноматериалов и наноструктур. Тр. V Всерос. школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых*, т. II, Рязань, 2012. 114 с.
- [23] Толстихина А.Л. *Атомно-силовая микроскопия кристаллов и пленок со сложной морфологией поверхности*. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2013. 333 с.
- [24] Годуа П.А. Метрология в нанотехнологии. *Российские нанотехнологии*, 2007, т. 2, № 1–2, с. 61–69.

References

- [1] Mayssel L., Gleng R. *Technology of Thin Films: Handbook*. New York, McGraw-Hill, 1970. (Russ. ed.: Mayssel L., Gleng R. *Tekhnologiya tonkikh plenok (spravochnik)*. Vol. 2. Moscow, Sovetskoye radio publ., 1977. 768 p.
- [2] Sherchenkov A.A., Shtern Yu.I. *Materialy elektronnoy tekhniki: Laboratornyy praktikum* [Electronic equipment: Laboratory workshop]. Pt. 3. Moscow, MIET publ., 2004. 86 p.
- [3] Antonenko S.V. *Tekhnologiya tonkikh plenok* [Thin film technology]. Moscow, MIFI publ., 2008. 104 p.
- [4] *Handbook of thin film deposition*. Ed. Seshan K., Schepis D. William Andrew, 2018. 470 p.
- [5] Venables J.A., Spiller G.D.T., Hanbucken M. Nucleation and growth of thin films. *Reports on progress in physics*, 1984, vol. 47, no. 4, pp. 399–459, doi: 10.1088/0034-4885/47/4/002
- [6] Oreshkin O.M. *Razrabotka sistemy nepreryvnogo kontrolya sherokhovatosti poverkhnosti dlya povysheniya effektivnosti tekhnologii lazernogo polirovaniya aviatsionnykh detaley*. Kand. Diss. [Development of a system for continuous monitoring of surface roughness to improve the efficiency of laser polishing technology for aircraft parts. Cand. Diss.] Moscow, 2017. 134 p.
- [7] Lee B.S., Strand T.C. Profilometry with a coherence scanning microscope. *Applied optics*, 1990, vol. 29, no. 26, pp. 3784–3788, doi: 10.1364/AO.29.003784
- [8] Su X., Chen W. Fourier transform profilometry: a review. *Optics and lasers in Engineering*, 2001, vol. 35, no. 5, pp. 263–284, doi: 10.1016/S0143-8166(01)00023-9
- [9] Wang Z., Nguyen D.A., Barnes J.C. Some practical considerations in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 218–225, doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.06.005
- [10] *Fizika tonkikh plenok. T. 3. Sovremennoye sostoyaniye issledovaniy i tekhnicheskiye primeneniya* [Physics of thin films. Vol. 3. Current State of Research and Technical Applications]. Ed. Khass G., Tun R.E. Moscow, Mir publ., 1968. 331 p.
- [11] Novodvorskiy O.A., Khramova O.D., Ventsel' K., Barta Y.V. Dimensional effects of static conductivity in tantalum thin films. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 75, no. 6, pp. 42–45 (in Russ.).
- [12] Metfessel' S. *Tonkiye plenki, ikh izgotovleniye i izmereniye* [Thin films, their manufacture and measurement]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat publ., 1963. 272 p.
- [13] Sergeev A.G. *Vvedeniye v nanometrologiyu* [Introduction to nanometrology]. Vladimir, VISU publ., 2010. 296 p.
- [14] Gallyamov M.O. *Skanirovaniye zondovaya mikroskopiya nukleinykh kislot i tonkikh organicheskikh plenok*. Kand. Diss. [Scanning probe microscopy of nucleic acids and thin organic films. Cand. Diss.]. Moscow, 1999. 227 p.
- [15] Ishchenko A.A., Fetisov G.V., Aslanov L.A. *Nanokremniy: svoystva, polucheniye, primeneniye, metody issledovaniya i kontrolya* [Nano-silicon: properties, production, application, methods of research and control]. Moscow, Fizmatlit publ., 2012. 648 p.

- [16] Smith D.L. *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. McGraw-Hill Education, 1995. 616 p.
- [17] Eaton P., West P. *Atomic force microscopy*. Oxford, Oxford University Press, 2010. 248 p.
- [18] Kats M.A., Blanchard R., Genevet P., Capasso F. Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media. *Nature materials*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 20–24, doi: 10.1038/nmat3443
- [19] Rugar D. Atomic force microscopy. *Physics today*, 1990, vol. 43, no. 10, pp. 23–30, doi: 10.1063/1.881238
- [20] *Nanotekhnologii v poluprovodnikovoy elektronike* [Nanotechnology in semiconductor electronics]. Ed. Aseyev A.L. Novosibirsk, SO RAN publ., 2004. 368 p.
- [21] Morita S., Giessibl F.J., Meyer E., Wiesendanger R. *Noncontact atomic force microscopy*. Vol. 3. Springer, 2015. 539 p.
- [22] Vishnyakov N.V., Mishustin V.G., Avachev A.P., Shilin A.V. Diagnostics of thin-film micro- and nanostructures based on disordered semiconductors. *Diagnostika nanomaterialov i nanostruktur. Trudy 5 Vserossiyskoy shkoly-seminara studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Diagnostics of nanomaterials and nanostructures. Proceedings of the 5 All-Russian Workshop School for Students, Postgraduates and Young Scientists]. Vol. II, Ryazan, 2012. 114 p.
- [23] Tolstikhina A.L. *Atomno-silovaya mikroskopiya kristallov i plenok so slozhnoy morfologiyey poverkhnosti*. Dokt. Diss. [Atomic force microscopy of crystals and films with complex surface morphology. Doct. Diss.]. Moscow, 2013. 333 p.
- [24] Todua P.A. Metrology in nanotechnology. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 2007, vol. 2, no. 1–2, pp. 61–69 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.12.2018

Информация об авторах

ШУПЕНЕВ Александр Евгеньевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ash@bmstu.ru).

ПАНКОВА Наталия Сергеевна — инженер, НУК МТ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pankova.nataliya2014@yandex.ru).

КОРШУНОВ Иван Сергеевич — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: korshunovivan@gmail.com).

ГРИГОРЬЯНЦ Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mt12@bmstu.ru).

Information about the authors

SHUPENEV Aleksandr Evgenievich — Candidate of Science (Eng.), Teaching Assistant, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ash@bmstu.ru).

PANKOVA Nataliya Sergeevna — Engineer, Research and Training Centre for Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pankova.nataliya2014@yandex.ru).

KORSHUNOV Ivan Sergeevich — Postgraduate, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: korshunovivan@gmail.com).


GRIGORYANTS Aleksandr Grigorievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mt12@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шупенев А.Е., Панкова Н.С., Коршунов И.С., Григорьянц А.Г. Анализ разрушающих методов измерения и контроля толщины тонких пленок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 31–39, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-31-39

Please cite this article in English as:

Shupenev A.E., Pankova N.S., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. An Analysis of Destructive Methods of Thin Films Thickness Measurement. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 3, pp. 31–39, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-31-39



С.С. Рассоха, В.В. Селиванов

Осколочное действие боеприпасов

Взрыв и удар: физика, техника, технологии

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
С.С. Рассохи, В.В. Селиванова
«Осколочное действие боеприпасов»

Изложены современные представления о процессах разрушения оболочек осколочных боеприпасов, формировании осколочных полей и их действии по целям. Приведены схемы основных типов осколочных боеприпасов. Содержание учебного пособия соответствует курсам лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также собственным публикациям, посвященным исследованиям процессов высокоскоростного деформирования и разрушения металлических оболочек под действием продуктов детонации различных взрывчатых веществ.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Боеприпасы и взрыватели», аспирантов, научных и инженерно-технических работников отраслевых предприятий оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru