

И. В. ГОНЧАР, А. С. ИВАНОВ, В. В. МАНУХОВ, А. Б. ФЕДОРЦОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК

Изложены принципы интерферометрических измерений толщины прозрачных полупроводниковых и диэлектрических слоев. Приведено описание модернизированного интерферометра: его оптико-механический тракт, электронная схема и программное обеспечение. Представлены математическое обоснование принципов измерения и электрическая схема регистрации сигнала; описана программа обработки данных на ПК.

Ключевые слова: тонкая пленка, интерферометр, лазер, оптическая схема, обработка сигнала.

Введение. В настоящее время для контроля толщины слоев и пленок, прозрачных в видимой или инфракрасной областях спектра, широко используются лазерные интерференционные методы [1 — 3], позволяющие проводить измерения для большинства полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов. В основу этих методов положена интерференция лучей, один из которых отражается верхней поверхностью пленки (слоя), а другой — нижней.

Коэффициент отражения излучения пленкой, вследствие интерференции лучей внутри нее, зависит от соотношения между оптической толщиной пленки и длиной волны λ зондирующего излучения. Оптическая разность хода Δ при прохождении луча через тонкую прозрачную пленку определяется как

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

где d — толщина исследуемого образца пленки; n — оптический показатель преломления материала образца; θ — угол падения лазерного луча на образец.

Когда оптическая разность хода Δ между двумя отраженными лучами составит целое число длин волн, коэффициент отражения света пленкой будет максимальным. Иначе говоря, в отраженном свете будет наблюдаться интерференционный максимум. Если теперь подсчитать число интерференционных максимумов m , периодически возникающих при изменении угла падения светового луча на образец от θ_1 до θ_2 , то толщину пленки можно определить по формуле [3]

$$d = \frac{m\lambda}{2\left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}\right)}. \quad (2)$$

Для реализации данного метода измерений необходимо изменять в строго определенных пределах угол падения светового луча на образец в фиксированной точке на его поверхности. Поставленная задача была решена с помощью оптико-механической схемы [4], в которой единственным подвижным элементом было вращающееся плоское зеркало. В этой схеме использовалось известное из математики свойство эллипса: нормаль к эллипсу в любой точке является биссектрисой угла, образованного фокальными радиус-векторами этой точки. В результате световой луч, вышедший из одного фокуса эллипса, после отражения от любой точки эллипсоидной поверхности попадает во второй фокус эллипсоида. Созданный на основе предложенной схемы прибор [5] обеспечивает проведение 50 измерений толщины пленки в секунду при времени одного измерения менее 0,001 с. Это позволило контролировать толщины не только твердых, но и жидких пленок.

Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры состояло в промышленном изготовлении ее оптико-механической части, в разработке электронного усилителя-преобразователя для трансформации аналоговых сигналов фотодиода в коды, необходимые для ввода информации в персональный компьютер, и в разработке математического обеспечения — программ измерений и обработки результатов [6, 7].

В настоящее время возобновился интерес к контролю толщины тонких прозрачных слоев. В связи с этим авторами настоящей статьи была проведена модернизация созданного ранее интерферометра „Монохром-3“. Доработки коснулись как оптико-механического тракта, так и системы регистрации, сбора и обработки экспериментальных данных. На смену эллиптическим зеркалам пришли сферические линзы и зеркала [8]. Оптические схемы с использованием этих элементов приведены в работе [9]. Отметим, что сферические зеркала дешевле эллиптических и проще в изготовлении. При проектировании прибора можно выбрать сферические зеркала из перечня серийно выпускаемых, тогда как эллиптические зеркала — уникальные изделия, использующиеся, главным образом, в спектрометрах и спектрофотометрах. Изготовление эллиптических зеркал на заказ для небольшой партии приборов оказывается либо чрезвычайно дорогим, либо попросту невозможным. Поэтому обычно конструкторы вынуждены довольствоваться только имеющимися эллиптическими зеркалами определенных размеров с заданными геометрическими параметрами. В приборе „Монохром-3“ применяются нестандартный способ сопряжения с ЭВМ, устаревшие управляющая программа для MS-DOS и элементная база, что не позволяет полностью раскрыть потенциал прибора и использовать его с сегодняшними моделями компьютеров.

Поэтому была поставлена задача по разработке нового варианта прибора — „Монохром-4“. Использование современной элементной базы в схеме усилителя сигнала фотоприемника позволило снизить уровень шумов, увеличить точность измерений и уменьшить габариты устройства. Также был изменен способ сопряжения с компьютером. Применение аналого-цифрового преобразователя (АЦП) упростило задачу регистрации сигнала, а современное программное обеспечение для многозадачных операционных систем (LabView) позволило ускорить обработку данных и получить представление информации в графическом виде.

Оптико-механическая схема прибора. При создании интерферометра „Монохром-4“ были разработаны и испытаны два варианта описанных в работах [8, 9] оптико-механических схем: с использованием стеклянных линз и сферических зеркал с наружным напылением металла. В обеих конструкциях применялись одинаковые узлы и оптические элементы. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГ-207, генерирующий излучение с длиной волны $\lambda = 0,638$ мкм и мощностью 2 мВт. Установки были испытаны на полимерных

пленках, прозрачных в оптическом диапазоне. Вращение плоского зеркала осуществлялось двигателем постоянного тока ДПМ-24. Скорость вращения двигателя позволяла проводить 50 измерений в секунду. Зеркало устанавливалось таким образом, чтобы совместить ось вращения двигателя с плоскостью зеркала. Для измерения интенсивности отраженного от поверхности образца лазерного луча использовался кремниевый фотодиод ФД-7К. В схеме с линзами применялись две собирающие линзы диаметром 16 мм с фокусным расстоянием 12 мм. Первая линза размещалась на расстоянии 13—14 мм от поверхности образца. Возникновение сферической абберации делает невозможным использование всей поверхности линзы. “Полезный пробег” лазерного луча по ее поверхности составлял 10—11 мм. При этом диапазон изменения угла падения лазерного луча на образец равнялся 36° . Вторая линза обеспечивала попадание лазерного луча во входное окно фотоприемника.

В установке со сферическими зеркалами использовались два одинаковых вогнутых зеркала с фокусным расстоянием 30 мм. Эти параметры обеспечивают угловой диапазон не менее 40° .

Электронная схема сбора данных и обработки сигнала. Структурная схема электронной части прибора, отражающая последовательность регистрации и обработки сигнала, приведена на рис. 1, а. Усилитель-формирователь необходим для преобразования выходного тока фотоприемника во входное напряжение АЦП и создания на его входе требуемого уровня сигнала. Электронная схема усилителя-формирователя (рис. 1, б) позволяет согласовать выходное сопротивление фотодетектора с последующим входным сопротивлением АЦП для исключения потерь полезного сигнала и искажений формы его амплитудной огибающей. Для подачи напряжения смещения на фотоприемник и питания усилителя применен блок питания, схема которого обеспечивает выпрямленное двуполярное стабилизированное напряжение с малым уровнем пульсаций.

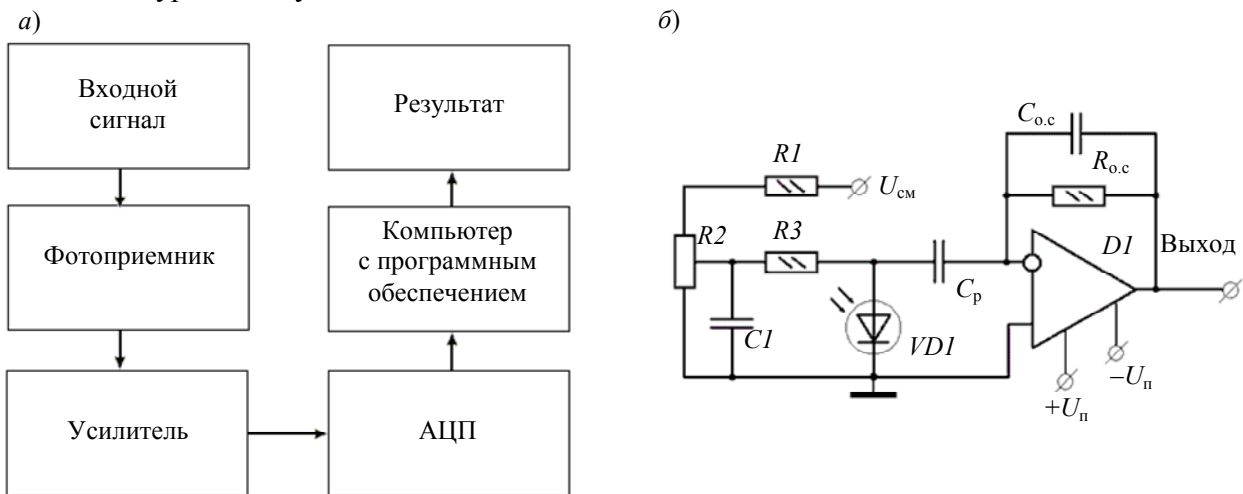


Рис. 1

После предварительного усиления аналоговый сигнал поступает на вход АЦП. Аналоговый сигнал отличается от других форм сигнала тем, что переносимая им полезная информация заключена не только в уровне сигнала, но и в самой форме огибающей, которая определяет его динамику. При обработке подобных сигналов существенными являются такие характеристики его формы, как крутизна, местоположение и характер пиков, а также точное количество этих пиков, что, безусловно, — наиболее важная характеристика для производимых вычислений в данном случае. Поэтому для получения как можно более точной формы сигнала необходимо использование высокоскоростного преобразователя, а измерения должны быть произведены с частотой, позволяющей корректно воспроизвести форму сигнала для его правильной обработки.

Определить требуемую частоту преобразования можно исходя из следующих соображений. Число интерференционных максимумов m , возникающих при изменении угла падения луча от θ_1 до θ_2 , связано с толщиной t пленки, длиной волны λ зондирующего луча и показателем преломления n материала пленки [1]:

$$m = \frac{t|\varphi(\theta_2) - \varphi(\theta_1)|}{\lambda}, \quad (3)$$

где $\varphi(\theta) = 2(n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}$.

При длине волны $\lambda = 0,63$ мкм, максимальной толщине измеряемой пленки 0,5 мм и реализуемых в приборе предельных углах $\theta_1 = 25^\circ$ и $\theta_2 = 60^\circ$ получаем число максимумов, а значит, и периодов изменения интенсивности отраженного пленкой сигнала, равное примерно 50.

Частота вращения вала электродвигателя, приводящего в движение плоское зеркало, составляет 50 Гц. Вследствие особенностей построения оптико-механической схемы прибора продолжительность временного интервала, в течение которого регистрируется интерференционная картина, составляет 1/150 от периода одного полного оборота зеркала. Следовательно, быстродействие регистрирующего устройства должно составить $50 \times 150 \times 50 = 375\,000$ операций/с.

Согласно критерию Найквиста, частота дискретизации должна по крайней мере вдвое превышать частоту сигнала, содержащего полезную информацию. Однако для того чтобы иметь возможность анализировать форму исследуемого сигнала, необходимо выбрать частоту дискретизации не в два, а минимум в пять раз больше, чем частота полезного сигнала [10]. Оптимальная частота дискретизации АЦП при проведении измерений была определена равной 1 МГц (при 14-битовой разрядности преобразователя).

Для исключения влияния помех и джиттера необходима синхронизация и измерений, и временная синхронизация выборки. Наиболее полно изложенным критериям удовлетворяет АЦП типа NI-5122 производства фирмы "National Instruments" (США), обладающий предельной частотой преобразования 100 МГц.

Программное обеспечение. Для автоматизации процесса измерений и достаточно быстрой обработки сигнала необходимо использование дополнительного программного обеспечения. В качестве инструмента для сбора данных, анализа полученной информации и вычислений была применена среда разработки LabView. С ее помощью была написана программа, позволяющая отслеживать получение данных и в реальном времени проводить вычисления толщины образца в зависимости от формы огибающей импульса $Q(\theta)$ при изменении угла падения луча на образец [11]. Структурная схема программы приведена на рис. 2 (для наглядности все подпрограммы обозначены пронумерованными прямоугольниками).

Для управления процессом аналого-цифрового преобразования использовался виртуальный подприбор NI-SCOPE Express (обозначенный на рисунке прямоугольником 1), с помощью которого также была решена проблема синхронизации. С выхода NI-SCOPE Express цифровой сигнал поступает на стандартный подприбор Extract Portion of Signal (прямоугольник 2) для выделения части сигнала, необходимой для дальнейшей обработки. Выбором части сигнала можно управлять также вручную посредством элементов, подключенных к этому подприбору. Скриншот части пользовательского интерфейса, визуализирующий сигнал, поступающий с оптико-механического блока на АЦП, и выделяющий полезную часть этого сигнала, представлен на рис. 3, а, б соответственно.

Для последующей обработки необходимо преобразование типов данных, а также их инвертирование. Эти операции выполняются подпрограммой, обозначенной прямоугольником 3 на рис. 2. В полученном после инверсии массиве данных содержится информация о виде функции $Q(\theta)$. Этот массив данных обрабатывается подпрограммой (прямоугольник 4 на рис. 2)

для получения информации о количестве интерференционных максимумов в импульсе. В ней производится выравнивание сигнала по уровню и дифференцирование его для исключения постоянной составляющей импульса. После этого создается новый массив, содержащий „1“ при распознавании интерференционного локального максимума и „0“ в остальных случаях, затем ведется подсчет суммы элементов этого массива. Вычисленная сумма и будет равна численно количеству интерференционных максимумов, содержащихся в функции $Q(\theta)$ при изменении угла в пределах от θ_1 до θ_2 .

После того как количество максимумов определено, задачу о толщине пленки можно считать решенной в силу уравнения (3).

Вычисление конечного результата выполняется в подпрограмме 5 (см. рис. 2). Значение показателя преломления, необходимое для вычисления толщины, для удобства оператора вводится в этот модуль отдельно для целой и дробной частей.

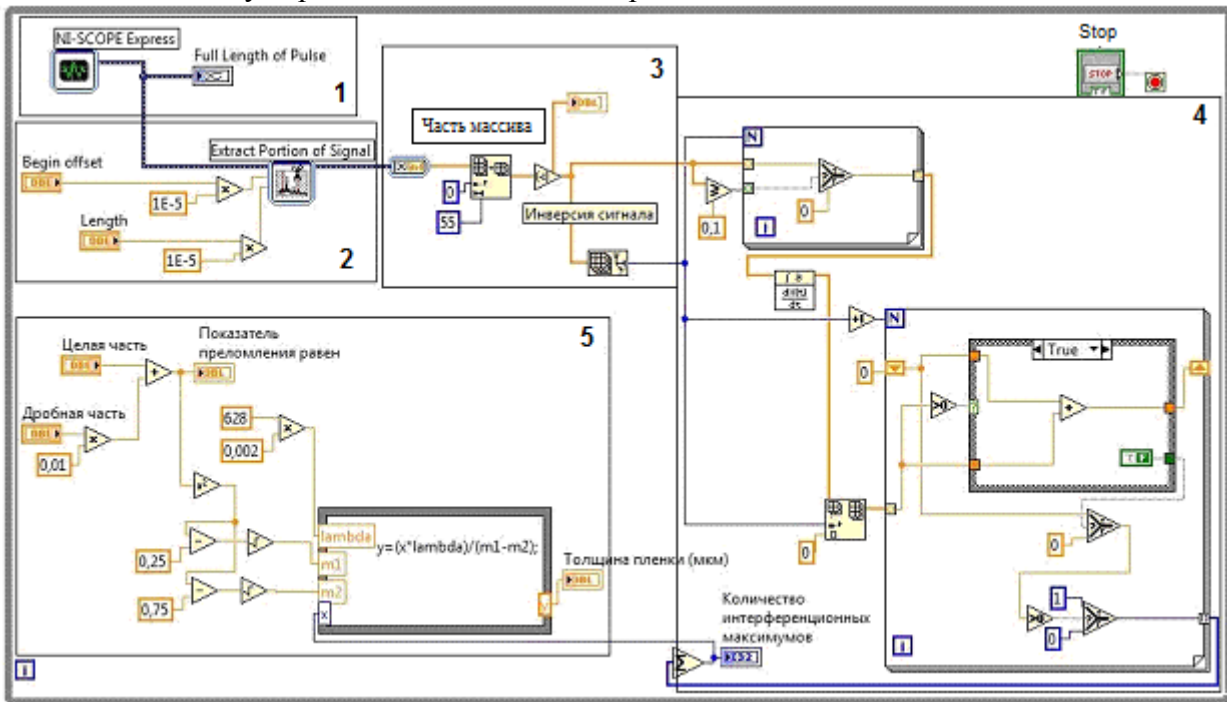


Рис. 2

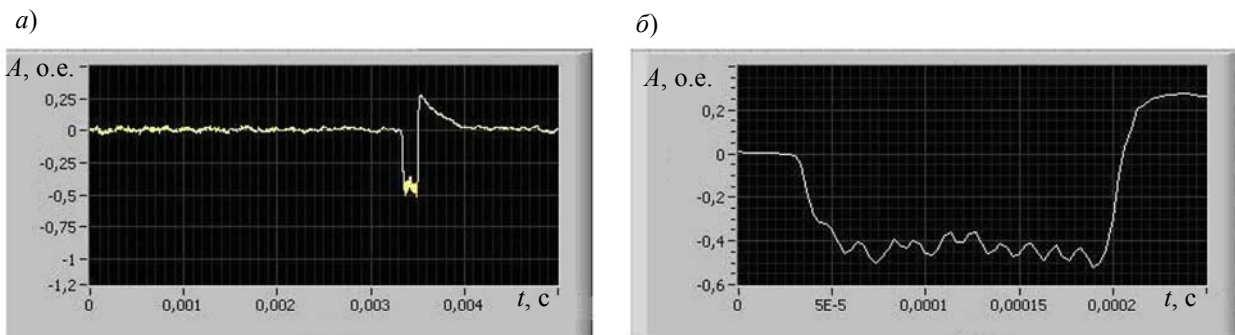


Рис. 3

Контрольные измерения. Для проведения контрольных испытаний были выбраны две пленки различной толщины, изготовленные из полипропилена (показатель преломления n для данного материала равен 1,48). Толщины пленок измерялись как с помощью предложенных оптико-механических схем, так и с помощью микрометра. Погрешность механического

лабораторного микрометра определялась как половина цены деления прибора, равного 0,01 мм, и составляла 5 мкм. Результаты измерений приведены в таблице.

Объект исследования	Толщина пленки, мкм, при измерениях на основе		
	схемы с использованием линз	схемы с использованием сферических зеркал	контактного способа (микрометр)
Пленка № 1	52,86	53,48	50
Пленка № 2	21,71	21,15	20

Погрешность предложенного метода измерений зависит от количества интерференционных максимумов, регистрируемых прибором, и при неблагоприятных условиях (локальных загрязнениях образца, неточности его крепления) составляет ± 1 максимум, с увеличением толщины образца погрешность метода снижается. Рассчитанная приборная погрешность составляет менее 2 мкм, что меньше приборной погрешности лабораторного микрометра. При необходимости повышения точности измерений может быть введена дополнительная программа обработки сигнала, позволяющая получать значения толщины с учетом коэффициента отражения при одном из фиксированных углов падения луча, аналогично тому, как это описано в работе [10].

Отдельно следует отметить, что механический микрометр не позволяет измерять толщину в определенной точке; толщина определяется для некоторой площади образца, расположенной между губками микрометра. Реализованный оптический метод обеспечивает измерения толщины пленочных материалов в отдельно взятой области диаметром 200 мкм. Это является преимуществом данного метода в одних случаях, и недостатком в других, так как возможны колебания толщины образца в зависимости от того, в какой его части производятся измерения (напомним, что пленочные материалы могут иметь локальные дефекты в виде утолщения материала или уменьшения его толщины).

Заключение. В результате модернизации прибора было реализовано стандартное сопряжение с современными компьютерами и обеспечен режим вычислений в реальном времени с использованием графических возможностей современных операционных систем для вывода значений толщины.

Результаты проведенных исследований показывают также, что бесконтактные лазерные методы контроля толщин прозрачных слоев и пленок обеспечивают более высокую точность, чем контактные методы, и обладают повышенным быстродействием и локальностью измерений. Приборную погрешность интерференционных измерений можно снизить при необходимости еще в 10—20 раз [10].

Разработанные методы и устройства, позволяющие изменять угол падения лазерного луча на поверхность образца в заранее заданной точке, представляют самостоятельный технический интерес при проведении интерференционных измерений в других областях. Например, при измерении электрофизических параметров полупроводниковых материалов через образец пропускают зондирующее лазерное излучение. При этом угол падения лазерного луча на полупроводник изменяется путем вращения самого образца. При контроле структур металл—диэлектрик—полупроводник такой подход (работа на „просвет“) невозможен из-за наличия металлического слоя внутри структуры. Использование предложенных в настоящей статье оптических схем позволяет исследовать подобные структуры, регистрируя сигнал, отраженный от их поверхности.

Созданный быстродействующий лазерный интерферометр „Монохром-4“ получил серебряную медаль на Петербургской технической ярмарке 2011 г. в номинации „Новые высокотехнологичные разработки оборудования и наукоемкие технологии“. Этот прибор обеспечивает получение большого объема информации, чем это необходимо для контроля толщины

одного прозрачного слоя. В настоящее время изучаются методы обработки этой информации для получения данных о толщине слоев в двух- и многослойных покрытиях.

Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“, научный проект № 4232, и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, гранты П898 и 16.740.111.0144.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ohyama T., Mori Y. H.* Optical method for measuring uniform thickness of the order of 10 μm — 1 mm of transparent solid and liquid films // *Rev. Sci. Instruments.* 1987. Vol. 58, N 10. P. 1860—1864.
2. *Ohyama T., Endoh K., Mikami F., Mori Y. H.* Optical interferometry for measuring insaneous thickness of transparent solid and liquid films // *Rev. Sci. Instruments.* 1988. Vol. 59. P. 2018.
3. *Nosoko T., Mori Y. H., Nagata T.* Improved interferometer for measuring unsteady film thickness // *Rev. Sci. Instruments.* 1996. Vol. 67. P. 2685—2690.
4. Быстрое измерение угловой зависимости коэффициента отражения лазерного луча неподвижным образцом / *А. С. Иванов, Д. Г. Летенко, И. А. Торчинский, А. Б. Федорцов, Ю. В. Чуркин* // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 4. С. 222—224.
5. A fast operating device for measuring the thickness of transparent solid and liquid films / *A. B. Fedortsov, D. G. Letenko, Yu. V. Churkin, I. A. Torchinsky, A. S. Ivanov* // *Rev. Sci. Instruments.* 1992. Vol. 63, N 7. С. 3597—3582.
6. *Ценципер Л. М., Федорцов А. Б., Летенко Д. Г.* Прибор для измерения кинетики растекания и испарения жидких пленок в реальном масштабе времени // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 154—157.
7. The laser interferometry for the investigation of the evaporation kinetics of liquid films / *A. B. Fedortsov, D. G. Letenko, L. M. Tsentsiper, A. S. Ivanov, I. A. Torchinsky* // *Europhysics Conference Abstracts.* 1993. Vol. 17. P. 1535.
8. Пат. 2102702 РФ. Устройство для неразрушающего измерения толщины диэлектрических и полупроводниковых пленок / *А. Б. Федорцов* // Оpubл. 20.01.98. Бюл. № 2.
9. *Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.* Быстродействующий прибор для контроля угловой зависимости коэффициента отображения лазерного луча // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2011. Т. 54, № 3. С. 61—64.
10. *Федорцов А. Б., Прокофьева К. Е.* Применение гелий-неонового лазера в интерференционном методе измерения толщины пленок // *Электронная техника. Материалы.* 1974. № 4. С. 117—122.
11. *Трэвис Дж., Кринг Дж.* LabView для всех. М.: ДМК Пресс, 2008.

Сведения об авторах

- Игорь Валерьевич Гончар** — аспирант; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: ivgonet@rambler.ru
- Алексей Сергеевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: physics@nwpi.ru
- Василий Владимирович Манухов** — аспирант; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: karven@list.ru
- Александр Борисович Федорцов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Северо-Западный заочный технический университет, кафедра физики, Санкт-Петербург; E-mail: physics@nwpi.ru

Рекомендована кафедрой физики

Поступила в редакцию 21.12.11 г.