

Рисунок 3 – Узел крепления исследуемого образца в измерителе температурного коэффициента показателя преломления лазерных материалов

Технические характеристики разработанного измерителя приведены в таблице 1.

Таблица 1– Технические характеристики измерителя температурного коэффициента показателя преломления лазерных материалов

Длина волны излучения	405, 532, 652, 1064 нм
Чувствительность к изменению длины оптического пути	$0.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Точность определения коэффициента dn/dT	$1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Размер образца	от $8 \times 4 \times 4 \text{ мм}^3$
Число образцов*	1, 2 и 3 шт.
Градиент температуры	10°C/мм
Возможность определения знака величин dn/dT	да
Возможность измерений	да

УДК 620.179.14+537.3222.11

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ДВУХСЛОЙНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Лухвич А.А., Булатов О.В., Шарандо В.И.
Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Задачи толщинометрии двухслойных покрытий достаточно сложны. Применение различных методов контроля с учетом сочетаний материалов покрытия и основания, диапазонов контролируемых толщин, погрешностей позволит в значительной мере оптимизировать методики и создать средства их реализации. В настоящее время возрастает потребность в средствах контроля камер сгорания жидкостных ракетных двигателей и других изделий ракетной техники с хромоникелевыми покрытиями (хром толщиной до 200 мкм на никеле до 700 мкм) на основаниях из бронзы БрХ08. В данной работе исследованы

в поляризованном свете
* для изотропных, оптически одноосных и двухосных материалов

Применение разработанного измерителя позволит существенно упростить процедуру определения температурного коэффициента показателя преломления, а также получить дополнительную информацию о его зависимости от поляризации и длины волны излучения. Данный измеритель будет эксплуатироваться в научных исследованиях и в учебном процессе в БНТУ.

Созданный измеритель был апробирован путем измерения температурных коэффициентов главных показателей преломления dn_p/dT , dn_m/dT и dn_g/dT для оптически двухосных кристаллов калий-иттриевого вольфрамата с ионами иттербия $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$, которые широко используются в лазерной технике. На длине волны излучения 1064 нм получены значения -14.6 , -8.9 и $-12.4 [10^{-6} \text{ K}^{-1}]$.

Созданный опытный образец измерителя находится в Научно-исследовательском центре оптических материалов и технологий БНТУ.

1. On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials / S. Chenais [et. al.] // Progr. Quant. Electron. – 2006. – Vol. 30. – P. 89–153.
2. Thermo-optic coefficients of monoclinic $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ / S. Vatnik [et. al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 95. – P. 653–656.
3. Thermo-optical properties of pure and Yb-doped monoclinic $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystals / P.A. Loiko [et. al.] // Appl. Phys. B. – 2012. – Vol. 106. – P. 663–668.

возможности магнитодинамического и термоэлектрического методов при контроле толщины таких покрытий.

Магнитодинамический метод обеспечивает по сравнению с другими магнитными более высокую разрешающую способность, диапазон измерений [1-3] и может использоваться при контроле толщины хромовых покрытий с учетом толщины никеля, никелевых покрытий, в том числе под хромом [2].

При реализации термоэлектрического метода [4] на поверхность изделия устанавливают холодный и нагреваемый электроды с поддержки

ваемой между ними постоянной разностью температур, затем измеряют возникающую в цепи термоЭДС. Характер получаемой зависимости, чувствительность к толщине покрытия определяются соотношением абсолютных термоЭДС материалов контактных электродов, покрытия, основания и температурами в контактах нагреваемого электрода с покрытием и покрытия с основанием. Ранее [5] был выполнен значительный объем исследований для никеля толщиной от единиц до сотен микрометров на бронзе БрХ08, результаты которых свидетельствуют о высокой чувствительности и сравнительно малом влиянии на информативный сигнал структурного состояния никеля. Возможность контроля толщины хрома на никеле не рассматривалась, но она следует из большой разности коэффициентов абсолютной термоЭДС этих металлов. Для ее реализации требуется осуществить выбор материала и геометрии электродов с целью оптимизации чувствительности в заданном диапазоне толщин хрома. Также необходимо исследовать вытекающую из полученных ранее данных вероятность влияния на результаты измерений толщины никеля, материала основания в том случае, когда температура границы никель-бронза отличается от комнатной.

Для реализации обоих методов при контроле толщины хромоникелевых покрытий разработаны два преобразователя с оптимизированными параметрами. Магнитодинамический преобразователь [2] содержит постоянный стержневой магнит из неодим-железо-бора, обладающий коэрцитивной силой 900 кА/м и остаточной индукцией 1,25 Тл, при этом внешний диаметр экрана равен 16 мм. Термоэлектрический преобразователь содержит электроды из вольфрама с радиусом рабочих окончаний 2,5 мм и обеспечивает усилие прижима 3 Н. Для проведения измерений первый преобразователь был подключен к электронному блоку серийного толщиномера типа МТЦ-3 [3], второй – к блоку термоэлектрического прибора ПИТ-2 [6], поддерживавшему разность температур $T_H - T_0 = 50$ °С. Измерения выполнены на мерах толщины двухслойных (хром на никеле) гальванических покрытий, нанесенных на основания из бронзы БрХ08; значения толщин никеля и хрома на каждой мере указаны в таблице.

На рисунке 1 в виде точек 1-8 (номер каждой точки является одновременно номером соответствующей меры) показаны результаты, полученные вышеуказанным магнитодинамическим преобразователем при контроле толщины никеля под хромом (кривая построена по результатам измерений на мерах гальванических никелевых покрытий толщиной до 600 мкм без поверхностного слоя хрома, нанесенных на основания из бронзы БрХ08). Практически линейная зависи-

мость $F = f(b)$ свидетельствует о том, что данный преобразователь имеет постоянную разрешающую способность при толщине никеля до 570 мкм; при необходимости он обеспечивает диапазон измерений до 1000 мкм [1, 2]. Полученные результаты показывают, что дополнительная погрешность, обусловленная наличием хрома, возрастает с увеличением не только толщины хрома, но и толщины никеля, однако при использовании выбранного преобразователя ее величина составляет не более 10-15 %. Из полученных результатов следует, что магнитодинамический метод обеспечивает контроль толщины никелевых покрытий под хромовыми.

Номер меры	Толщина никеля, мкм	Толщина хрома, мкм
1	167	57
2	203	43
3	203	109
4	203	208
5	399	81
6	513	103
7	514	159
8	567	106

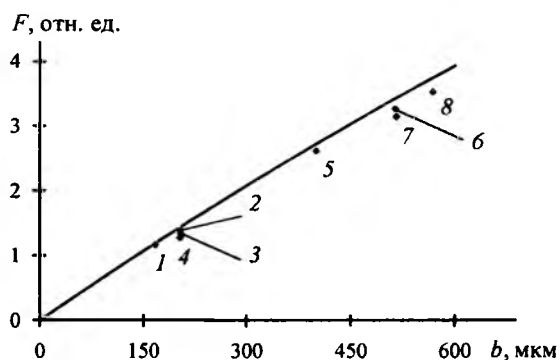


Рисунок 1 – Зависимость сигнала F магнитодинамического преобразователя от толщины b никеля

На рисунке 2 показаны результаты, полученные термоэлектрическим преобразователем в зависимости от толщины хрома на указанных в таблице мерах.

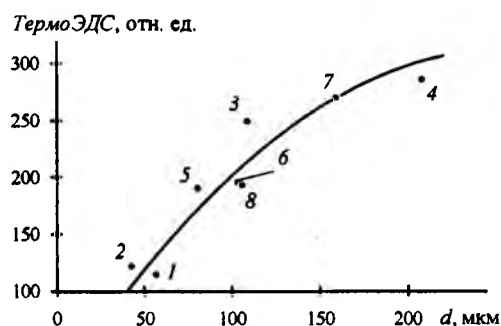


Рисунок 2 – Зависимость термоЭДС от толщины d хрома на никеле

Сигнал термоэлектрического преобразователя однозначно зависит от толщины хрома, при этом обеспечивается высокая (до микрометра) разрешающая способность. Разброс показаний, обусловленный вариацией толщины никеля, свидетельствует о том, что температура в контактах никель-бронза остается постоянной независимо от толщины никеля в указанных диапазонах толщин обоих покрытий. При этом дополнительная термоЭДС, обусловленная температурой контакта никель-бронза, отсутствует; в итоге нет необходимости учитывать толщину никеля при контроле хрома.

Полученные в работе результаты показывают, что возможность контроля толщины двухслойных хромоникелевых покрытий расширяется при совместном использовании термоэлектрического и магнитодинамического методов. Термоэлектрический толщиномер, состоящий из электронного блока прибора ПИТ-2 и оптимизированного преобразователя, обеспечивает контроль хрома толщиной до 200 мкм без учета толщины никеля под хромом. Магнитодинамический толщиномер двухслойных покрытий МТДП-1, сертифицированный в Российской Федерации (Госреестр РФ № 50930-12, свидетельство № 47796), обеспечивает контроль никеля толщиной до 700 мкм под хромом толщиной до 150 мкм. Дальнейшее развитие работ в этом направлении связано с разработкой термоэлектрического прибора контроля толщины хромовых покрытий, его метрологическим обеспечением, разработкой методики одновременного использования средств магнитодинамической и термоэлектрической толщинометрии.

1. Лухвич, А.А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А.А. Лухвич, О.В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.
2. Лухвич, А.А. Послойный контроль толщины хромоникелевых покрытий магнитодинамическим методом / А.А. Лухвич, О.В. Булатов // Приборостроение-2008: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 12-14 ноября 2008 г. / Белорусский национальный технический университет; редколлегия: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: 2008. – С. 135–137.
3. Лухвич, А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения / А.А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
4. Суворов, Л.М. Термоэлектрический метод измерения толщины гальванических покрытий / Л.М. Суворов // Заводская лаборатория. – 1964. – Т. 30. – № 8. – С. 959–962.
5. Шарандо, В.И. Перспективы термоэлектрического метода в исследовании свойств металлов и поверхностных слоев / В.И. Шарандо // Достижения физики неразрушающего контроля: сборник научных трудов, посвященный 40-летию ИПФ НАН Беларуси. – Минск: 2003. – С. 99–118.
6. Приборы термоэлектрические типа ПИТ // ИПФ НАН Беларуси [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://iaph.basnet.by/~lab1/ru/pit.html>. – Дата доступа: 09.06.2013.

УДК 621.317.4

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИМП-В

Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Гусев А.П., Пиунов В.Д.

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики

Национальной академии наук Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

При создании Эталона единицы магнитной индукции слабого постоянного магнитного поля в диапазоне 0,1 – 50 мТл для измерений и использования в качестве компаратора потребовался чувствительный и стабильный измеритель магнитной индукции. Серийных и недорогих измерителей с требуемыми нами характеристиками такими, как порог реагирования в 10^{-3} - 10^{-4} мТл и высокая стабильностью не существует. Поэтому применительно к требованиям эталона по диапазону и погрешности в лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси разработан высокочувствительный измеритель магнитной индукции ИМП-В, предназначенный для изме-

рения и компарирования индукции постоянного магнитного поля в составе комплекса средств измерений вышеуказанного эталона.

ИМП-В выполнен в виде портативного блока измерения (в пластмассовом корпусе) и соединенного с ним экранированным кабелем первичного преобразователя Холла. В комплект входит также «нуль-камера» (многослойный магнитный экран из пермаллоя), устраняющая при установке в неё преобразователя прибора влияние мешающих внешних магнитных полей.

Питание на блок измерения подаётся при его подключении через USB порт к работающему с ним в комплексе персональному компьютеру