

Измерение микродеформаций с помощью волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо низкого контраста

А.А. Черторийский
Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Ульяновск, Россия
a-tchertor@yandex.ru

А.М. Низаметдинов
Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Ульяновск, Россия
anizametdinov@ulireran.ru

А.Д. Шуравин
Ульяновский государственный
технический университет
Ульяновск, Россия
shuravin_artem@mail.ru

Аннотация—Рассмотрено применение волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо низкого контраста для измерения термодформаций в мощных полупроводниковых приборах. Предложен вариант сигнальной обработки с использованием двух полупроводниковых лазеров и перестройкой их длины волны излучения. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова— интерферометр, волоконная оптика, термодформации, полупроводниковый лазер, мощные полупроводниковые приборы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры являются удобным инструментом для измерения линейных размеров, деформаций и перемещений. Разрешающая способность интерферометров составляет доли от длины волны излучения используемых лазеров, а диапазон измеряемых перемещений может составлять десятки метров [1,2]. По сравнению с контактными методами сканирования, интерферометры исключают физическое воздействие на испытуемый объект и имеют более высокую разрешающую способность в динамическом режиме [2]. В тоже время существует ряд задач по измерению малых перемещений, сравнимых с длиной волны излучения. Примером подобной задачи является измерение деформаций кристаллов мощных полупроводниковых приборов при их нагреве и охлаждении в процессе работы [3,4]. Амплитуда данных термодформаций не превышает сотен нанометров [3], а времена процессов при импульсном воздействии лежат в диапазоне от единиц до сотен миллисекунд [3,5]. Очевидно, что при проведении подобных измерений конструкция интерферометра может быть значительно упрощена. Одним из вариантов является волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо низкого контраста с активным гомодинированием [3]. Разработанная авторами на его основе измерительная установка подтвердила свою работоспособность. Основным ее недостатком являлась невозможность измерения деформаций с частотами выше 10 Гц. Это было связано с необходимостью применения дополнительной модуляции разности фаз с помощью пьезоподвижки на частоте около 2 кГц. Кроме того, использование He-Ne лазера с последующим вводом излучения в оптическое волокно с помощью микрообъектива делало данную установку стационарной. Таким образом, при разработке новой установки основными задачами являлись

расширение частотного диапазона измеряемых деформаций и обеспечение ее портативности.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Упрощенная структурная схема нового варианта измерительной установки представлена на рис. 1. В установке используется излучение двух полупроводниковых лазеров с длиной волны 1310 и 1550 нм, размещенных в лазерных блоках (ЛБ) (рис. 2). Излучение лазеров объединяется с помощью волоконно-оптического Y-разветвитель (Р) и, пройдя через циркулятор (Ц), поступает на поверхность исследуемого объекта. Часть излучения, отраженного объектом, возвращается в волокно и, пройдя через циркулятор, падает на оптический спектральный мультиплексор (СМ). Данный элемент разделяет излучение лазеров по длинам волн, направляя на входы фотоприемников Ф1 и Ф2. Сигналы с выходов фотоприемников через усилители У1 и У2 поступают в блок контроля и управления для дальнейшей обработки. В качестве источников излучения в установке используются лазерные модули марки LDI-1310-DFB-2.5G-20/80 и LDI-1550-DFB-2.5G-20/70. Внутри лазерных модулей (рис. 2) помимо самого полупроводникового лазера 2 расположен фотоприемник (Ф), выходной ток которого прямо-пропорционален мощности излучения, а также устройство нагрева/охлаждения (УНО) на основе элемента Пельтье. Ток накачки полупроводникового лазера формируется с помощью регулируемого источника тока (ИТ) по сигналам от блока контроля и управления. Падение напряжения на лазере, возникающее при протекании данного тока, через усилитель (УНП) поступает на вход блок контроля и управления и используется при вычислении длины волны излучения [6].

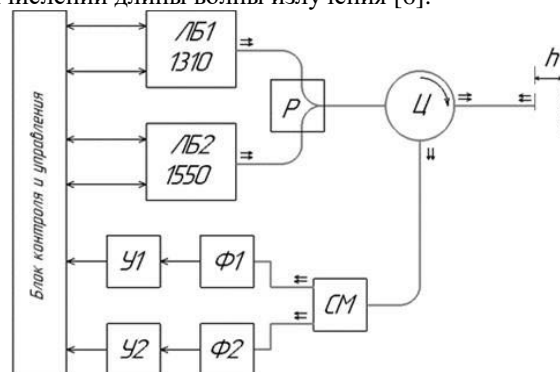


Рис. 1. Упрощенная структурная схема измерительной установки

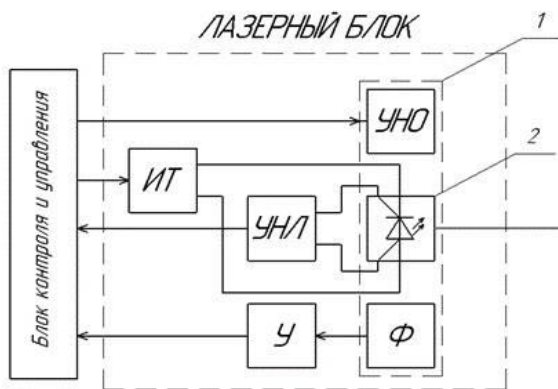


Рис. 2. Структурная схема лазерного блока

3. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ

Интерферометр Фабри-Перо низкого контраста формируется выходным торцом оптического волокна и отражающей поверхностью исследуемого объекта. Принцип работы заключается в измерении разности фаз между лучом, отраженным от поверхности исследуемого объекта и лучом, отраженным от выходного торца оптического волокна. Разность фаз возникает из-за того, что луч, отраженный от объекта, проходит дополнительный оптический путь, равный удвоенному расстоянию h между торцом волокна и отражающей поверхностью. При деформации контролируемого объекта расстояние h изменяется, что приводит к изменению разности фаз интерферирующих лучей и, как следствие, к изменению выходного сигнала фотоприемника. Зависимость амплитуды выходного сигнала от расстояния h для двух используемых в установке длин волн представлена на рис. 3. Из-за периодичности выходного сигнала интерферометра возникает неопределенность при измерении на одной длине волны. Однозначное преобразование изменения амплитуды сигнала в перемещение поверхности возможно при использовании квадратурных сигналов. Для этого было предложено работать на двух длинах волн. Из рис. 3 видно, что при определенных значениях h (на рисунке соответствует примерно 800 нм) выходные сигналы фотоприемников с большой точностью можно считать квадратурными, т.е. сдвинутыми относительно друг друга на 90 градусов. При этом данный фазовый сдвиг сохраняется в пределах примерно одного периода интерференции (соответствует изменению h на 500 нм). Практическую настройку интерферометра для получения квадратурных сигналов предлагается осуществлять за счет малого изменения длины волны излучения лазеров путем изменения их температуры [6]. Предлагаемый режим работы интерферометра соответствует работе на постоянном токе. В этом случае точность измерения зависит от того, насколько точно известна амплитуда сигнала в максимуме и минимуме интерференции. При измерении деформации реального объекта на амплитуду сигнала будет влиять непостоянство отражающей способности по поверхности исследуемого объекта. Минимизировать данное влияние

возможно путем калибровки. Калибровка возможна за счет температурной либо токовой перестройки длины волны лазера [6]. При токовой перестройке (учитывая малый диапазон перестройки) необходимо, чтобы измеряемый объект располагался на достаточно большом расстоянии от торца волокна. По результатам моделирования данное расстояние должно быть не менее 3 мм. В тоже время увеличение расстояния приводит к уменьшению контраста интерференционной картины, связанному с ограниченной длиной когерентности используемых полупроводниковых лазеров. Экспериментально было установлено, что увеличение расстояния свыше 30 мм нежелательно.

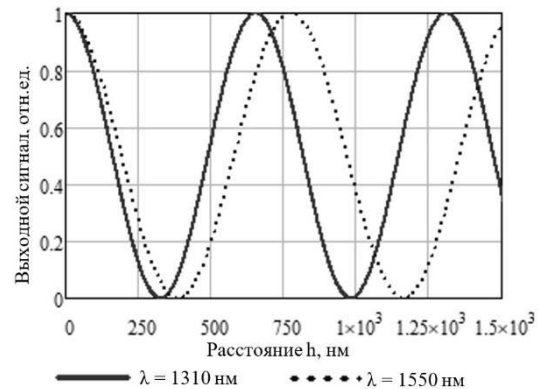


Рис. 3. Выходной сигнал с фотоприемников в зависимости от расстояния между торцом волокна и отражающей поверхностью

Таким образом, предлагаемый вариант интерферометра позволяет реализовать бесконтактное измерение деформаций амплитудой до 500...700 нм с частотами до сотен кГц. В связи с тем, что все компоненты системы достаточно компактны и не имеют устройств механической настройки, нет препятствий для реализации партитивного варианта установки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zavyalov, P.S. Investigation of the metrological characteristics of the PulsESPI system applied to the precision inspection of thermal deformations / P.S. Zavyalov, M.S. Kravchenko, V.V. Urzhumov, V.A. Kuklin, V.M. Mikhalkin // Siberian Journal of Science and Technology. – 2019. – Vol. 20(2). – P. 210-218.
- [2] Dobosz, M. Interferometric, absolute sensor of angular micro-displacement / M. Dobosz, M. Jankowski // Precision Engineering. – 2021. – Vol. 72. – P. 250-258.
- [3] Черторийский, А.А. Контроль температурных полей и теплофизических параметров мощных транзисторов дилатметрическим методом / А.А. Черторийский, В.А. Сергеев // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 10. – С. 41-46.
- [4] Vovnenko, N.V. Experimental Simulation and Theoretical Analysis of the Thermal Deformation of Dielectric Plates under Submicrosecond Radiation Heating / N.V. Vovnenko, B.A. Zimin, Yu.V. Sud'enkov // Technical Physics. – 2011. – Vol. 56(7). – P. 968-974.
- [5] Smirnov, V.I. Measuring Thermal Resistance of GaN HEMTs Using Modulation Method / V.I. Smirnov, V. Sergeev, A. Gavrikov, A. Kulikov // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – Vol. 67(10). – P. 4112-4117.
- [6] Borisov, Y.S. Measurement of spectra of fiber Bragg gratings by tuning the wavelength of a laser diode / Y.S. Borisov, A.M. Nizametdinov, O.V. Ivanov, A.A. Chertoriyskiy // Optics and Laser Technology. – 2022. – Vol. 151. – P. 108048-108055.