



УДК 621.387.3

А. С. Киселев, А. Е. Полоцкий, Е. А. Смирнов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Интерференционный контроль изменения толщины плоских прозрачных объектов на основе полупроводникового лазера видимого диапазона

*Разработан и исследован лазерный интерференционный измеритель изменения толщины плоских прозрачных объектов, основанный на физических принципах двухлучевой интерференции. Устройство включает в себя источник монохроматического излучения – полупроводниковый лазер, фотоприемное устройство на основе кремниевого фотодиода с двухкаскадным усилителем сигнала, а также блок отображения информации на базе USB-осциллографа, подключенного к компьютеру с необходимым программным обеспечением. Разработан алгоритм обработки информационного сигнала, позволяющий определять временные зависимости изменения толщины и температуры исследуемого объекта.*

### Интерференция, полупроводниковый лазер, изменение толщины

Высокая степень монохроматичности и направленности лазерного излучения позволяют в полной мере использовать явление интерференции для создания оптических измерительных устройств. На законах интерференции строятся лазерные измерители перемещений, системы контроля температуры, измерительные устройства оперативного контроля скорости процессов напыления, плазмохимического и ионно-химического травления оптически прозрачных пленок в электронике, измерители изменения толщины  $d$  прозрачных плоских объектов, углов клиновидности пластин и т. д. [1]. Первичная информация об изменении контролируемого параметра объекта возникает в подобных измерителях в результате интерференции волн, отраженных как минимум от двух оптических границ.

В основе интерференционных измерителей лежит контроль изменения средней плотности потока, обусловленного суперпозицией электромагнитных волн, отраженных от двух или более границ сред с различными показателями преломления. Изменение положения границ приводит к соответствующему изменению разности хода отдельных волн и их фаз.

При нормальном падении лазерного излучения в условиях двухлучевой интерференции интенсивность суммарного отраженного пучка изменяется по синусоидальному закону в зависимости от разности фаз  $\Delta\varphi$  двух интерферирующих волн. Интенсивность суммарного отраженного пучка  $I$  для двух интерферирующих волн определяется как

$$I = AE_c^2 = A(E_1^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\varphi_\Sigma + E_2^2),$$

где  $A$  – размерный множитель;  $E_1$  и  $E_2$  – амплитуды напряженности электрического поля световой волны;  $\Delta\varphi_\Sigma$  – разность фаз двух волн в данной точке.

При  $E_1 = E_2$  зависимость  $I = f(\Delta\varphi_\Sigma)$  имеет вид  $(1 + \cos \Delta\varphi_\Sigma)$ . Максимумы интенсивности соответствуют условиям  $\cos \Delta\varphi_\Sigma = 1$  или  $\Delta\varphi_\Sigma = 2m\pi$ , минимумы:  $\cos \Delta\varphi_\Sigma = -1$  или  $\Delta\varphi_\Sigma = (2m + 1)\pi$ , где  $m = 0; \pm 1; \pm 2, \dots$ .

Суммарная разность фаз  $\Delta\varphi_\Sigma$  складывается из разности фаз  $\Delta\varphi$ , обусловленной разностью хода двух волн, и скачков фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , возникающих при отражении от границ сред с различной оптической плотностью. При нормальном падении

излучения на границу  $\varphi = -\pi$  при отражении от более плотной среды ( $n_2 > n_1$ ) и  $\varphi = 0$  при отражении от менее плотной среды.

Рассмотрим, каким образом изменяется разность хода интерферирующих волн при отражении от плоской прозрачной среды с показателем преломления  $n_2$  и толщиной слоя  $d$  (рис. 1). Разность хода лучей  $I_1$  и  $I_2$   $|\Delta L| = n_2(AB + BC) - n_1AD$ ,  $AB + BC = 2d/\cos \theta_{\text{пр}}$ ,  $AD = AC \sin \theta_{\text{пад}} = 2d \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{пад}}$ . С учетом соотношения  $\sin \theta_{\text{пад}}/\sin \theta_{\text{пр}} = n_2/n_1$  имеем

$$|\Delta L| = 2dn_2 \left( \frac{1}{\cos \theta_{\text{пр}}} - \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{пр}} \right) = 2dn_2 \cos \theta_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Сдвиг фаз волны  $I_2$  относительно  $I_1$ , обусловленный разностью хода волн  $\Delta L$ , равен

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta L = 4\pi dn_2 \cos \theta_{\text{пр}}/\lambda.$$

Так как волна  $I_2$  отстает от  $I_1$ , то  $\Delta\varphi < 0$  и  $\Delta\varphi_{\Sigma} = \varphi_1 + \varphi_2 - \Delta\varphi$ . При реализуемом в интерференционном измерителе нормальном падении волны на границу раздела и выполнении условий  $n_2 > n_1, n_2 \gg n_3$ :  $\varphi_1 = -\pi$ ,  $\varphi_2 = 0$  и  $\cos \theta_{\text{пр}} = 1$ .

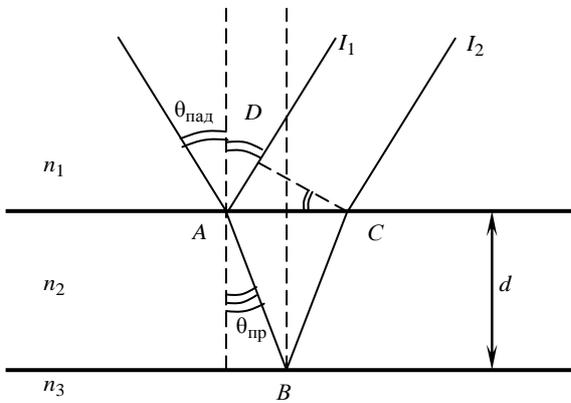


Рис. 1

Таким образом, при изменении  $d$  изменяется  $\Delta\varphi_{\Sigma}$ , а в соответствии с (1) и суммарная интенсивность  $I$ . Поскольку максимумы  $I$  соответствуют  $\Delta\varphi_{\Sigma} = 2m\pi$ , то при оговоренных ранее условиях для фазового сдвига получим

$$\Delta\varphi = 4\pi dn_2/\lambda = (2m + 1)\pi.$$

По значениям  $\Delta\varphi$  для двух произвольных значений  $m$ , различающихся на единицу, получим, что максимумы следуют через фиксированные

интервалы изменения толщины – дискреты:  $\Delta d' = \lambda/2n_2$ . Из условия интерференционного гашения двух волн для геометрического интервала  $\Delta d'$  между соседними минимумами интенсивности может быть получен тот же результат. Соответственно, интервалы между разноименными экстремумами будут соответствовать дискретам  $\Delta d'' = \lambda/4n_2$  [2].

На практике геометрическое изменение толщины  $\delta d$  слоя может происходить в процессе напыления слоя или его травления. Результирующее значение  $\delta d$  во время или после технологической обработки может быть определено как  $\delta d = M\Delta d' + N\Delta d'' + Q\Delta d''$ . Здесь  $M$  – число целых дискретов между одноименными экстремумами;  $N$  – число дискретов между разноименными экстремумами ( $N = 1$  или  $0$ );  $Q$  – дробная часть дискрета  $\Delta d''$  ( $0 < Q < 1$ ). Расчет  $\delta d$  может производиться в процессе автоматизированной или ручной обработки интерферограммы. Изменение геометрической толщины  $d$  слоя или пластины может происходить и под воздействием изменения температуры  $\delta T = T - T_0$ , где  $T$  и  $T_0$  – текущее и начальное значения температуры объекта. Полагая показатель преломления материала пластины  $n_2$  не зависящим от температуры, что допустимо для небольших изменений  $T$ , можно записать для термического изменения толщина пластины  $\delta d(T) = \alpha_T d (T - T_0)$ , где  $\alpha_T$  – относительный коэффициент линейного термического расширения материала пластины,  $K^{-1}$ . Таким образом, зная исходные физические и геометрические параметры пластины, по значению  $\delta d$  можно контролировать изменение температуры пластины.

В первоначальном варианте экспериментальная установка представляла собой интерференционный измеритель на основе гелий-неонового лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 632.8$  нм, работающего от высоковольтного блока питания [3]. Излучение лазера с помощью светоделительной пластины направлялось нормально на имитатор – стеклянную плоскопараллельную пластину, температура и толщина которой могли изменяться с помощью регулируемого нагревателя. Оптический сигнал, отраженный от пластины, регистрировался фотодиодом, усиливался и отображался на ленте самопишущего прибора. В ходе модернизации устройства была произведена замена высоковольтного гелий-неонового лазера на ма-

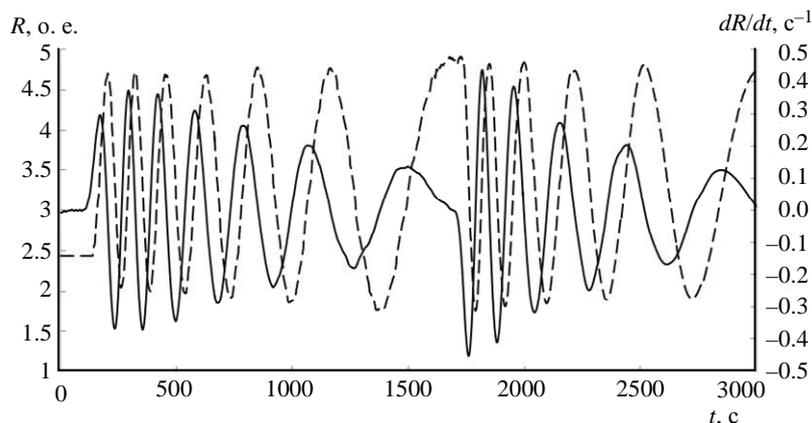


Рис. 2

ломощный полупроводниковый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 650$  нм, для питания которого был разработан портативный маломощный сетевой адаптер. Использование полупроводникового лазера позволило уменьшить энергопотребление, сократить габариты, упростить оптический блок. Отказ от высоковольтного источника питания He–Ne-лазера повысил электробезопасность установки. Для замены устаревшего блока регистрации был разработан новый двухкаскадный усилитель, адаптированный к современным средствам отображения информации. В модернизированном варианте устройства регистрация интерферограмм процессов «нагрев–остывание» пластины-имитатора проводилась с использованием компьютеризированного измерительного комплекса, на основе USB-модуля VM-8020, подключенного к компьютеру с необходимым программным обеспечением. Модуль совмещает в себе функции осциллографа и цифрового самопишущего устройства.

Для обработки полученных интерферограмм был разработан алгоритм, представляющий собой скрипт, написанный в среде MatLab и запускаемый в командной строке. В дальнейшем планируется разработка графического интерфейса и создание полноценной программы расчета изменения толщины и температуры объекта. Варьируемыми параметрами, которые задаются перед началом расчета, являются длина волны лазерного излучения и показатель преломления материала объекта. Для уменьшения влияния шумов на точность измерений исходный сигнал подвергается цифровой фильтрации. Параметры фильтра определяются пользователем. В целях определения точного положения экстремумов алгоритм обработки сигнала включает вычисление производной сигнала. Далее

определяются нули функции производной и формируется временная зависимость изменений толщины объекта  $\delta d$  или его температуры  $\delta T$ .

Графики временной зависимости коэффициента отражения (штриховая линия) и его производной (сплошная линия) представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что экстремумам коэффициента отражения соответствуют нули производной. Поскольку скорость изменения толщины уменьшается в конце периодов нагрева и охлаждения, помимо уменьшения частоты функции производной коэффициента отражения происходит и спад амплитуды функции по абсолютному значению.

В проводимом эксперименте в течение 30 мин осуществлялся нагрев пластины, а затем естественное охлаждение в течение 25 мин при выключенном питании резистивного нагревателя. Очевидно, в начальные периоды процессов нагрева и охлаждения скорости изменения толщины и температуры имеют наибольшие значения и с течением времени по мере установления теплового равновесия уменьшаются. На рис. 3 изменение толщины стеклянной пластины показано сплошной линией, изменение температуры – штриховой.

В интерференционном измерителе важным является условие нормального падения лазерного луча на поверхность объекта, что предъявляет высокие требования к юстировке системы. Оценим погрешность определения изменения толщины при угле падения ( $\theta_{\text{пад}}$ ), отличном от нулевого, и соответствующем ему углу преломления ( $\theta_{\text{пр}}$ ). Пусть толщина объекта изменилась на величину  $\Delta d = \lambda / 2n_2 \cos \theta_{\text{пр}}$ . Расчетное значение изменения толщина в предположении нормального падения лучей равно  $\Delta d' = \lambda / 2n_2$ . С учетом соотношения  $\sin \theta_{\text{пад}} = n_2 \sin \theta_{\text{пр}}$  [4] для погрешности определения изменения толщины получим

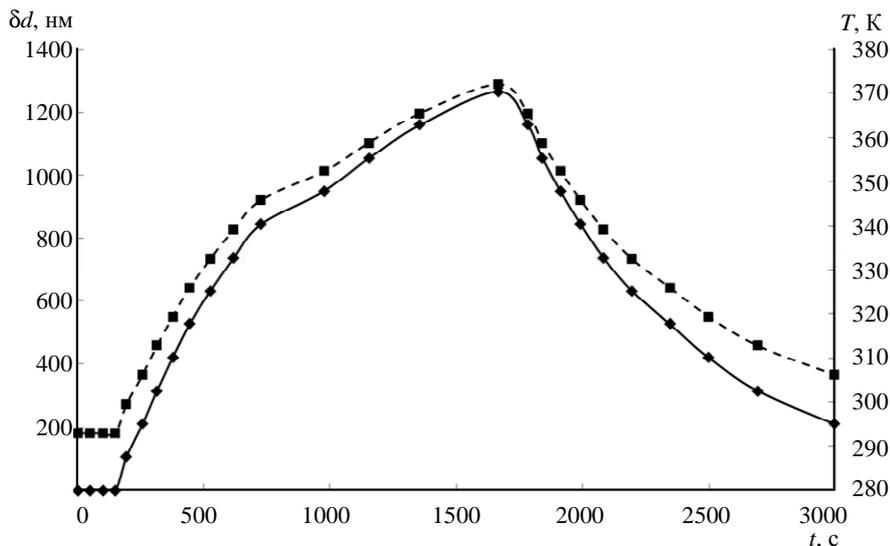


Рис. 3

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta d - \Delta d'}{\Delta d} \right| = 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\sin \theta_{\text{пад}}}{n_2} \right)^2}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при малых (до  $10^\circ$ ) углах падения погрешность измерения  $\delta d$  невелика и не превышает 1 %. При возрастании угла падения погрешность определения  $\delta d$  резко возрастает и, кроме того, уменьшается амплитудный размах интерферограммы за счет сокращения области перекрытия интерферирующих волн.

Очевидно, что уменьшение длины волны лазерного излучения приведет к уменьшению расстояний  $\Delta d'$  и  $\Delta d''$  между экстремумами на интерферограмме и, соответственно, повысит точность измерения  $\delta d$ . Поэтому в дальнейшем планируется использовать коротковолновый полупроводниковый лазер на основе нитрида галлия GaN с длиной волны излучения 405 нм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Е. А., Колгин Е. А., Черниговский В. В. Разработка лазерных устройств контроля температуры и толщины покрытий // Лазерная физика. 1995. № 10. С. 23.
2. Смирнов Е. А., Черниговский В. В. Применение лазеров. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.

3. Смирнов Е. А., Черниговский В. В. Физические основы лазеров и их типы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.
4. Смирнов Е. А., Киселев А. С. Основы лазерной техники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.

A. S. Kiselev, A. E. Polotskiy, E. A. Smirnov  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### INTERFERENCE CONTROL OF THE FLAT TRANSPARENT OBJECTS THICKNESS CHANGE ON THE BASIS OF VISIBLE RANGE SEMICONDUCTOR LASER

*Development and research of the laser interference measuring device for control of changes in the thickness of the flat transparent objects based on physical principles of two-beam interference is shown. The device includes a source of monochromatic radiation – a semiconductor laser, a photodetector based on silicon photodiode with two-stage signal amplifier and a control unit to display the information based on USB oscilloscope connected to a computer with the necessary software. The developed algorithm of processing of the information signal allows determination of the time dependence of the thickness changes and temperature of the object.*

**Interference, semiconductor laser, change of thickness**