

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В.И. Мордасов, Н.А. Сазонникова, А.А. Шуваев

Институт акустики машин,

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрен способ и испытательное оборудование для обнаружения поверхностных дефектов в виде царапин, трещин, изменения состояния поверхности детали в результате химического воздействия и абразивного износа с использованием лазерных систем. Построена математическая модель вероятности распознавания дефектов по достижению энергетического соответствия зондирующего сигнала геометрическим параметрам исследуемого участка поверхности. Проведена экспериментальная оценка влияния глубины, угла раскрытия и расположения плоскости симметрии трещины на изменение распределения интенсивности излучения в световом пятне при его поверхностном отражении. Показаны преимущества применения в малогабаритных контрольно-измерительных системах лазерных диодов с квантоворазмерными структурами на основе материалов четверных систем.

Введение

Ограниченные возможности традиционных механических и оптических методов оценки поверхностных повреждений (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждения и др.) и случайный характер распределения самих повреждений и их параметров (глубина, угол раскрытия и расположение плоскости симметрии трещины, одновременное наличие различных видов повреждений и др.) требуют создания новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхности. Преимуществами приборов, принцип действия которых основан на использовании лазерного излучения, являются бесконтактность, высокая информативность, быстродействие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные измерительные приборы имеют существенное превосходство перед другими средствами контроля состояния поверхностей деталей и применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности [1-2].

В данной работе приводятся методика и результаты исследования зависимости отражательной способности конструкционных материалов от состояния поверхности, вида повреждений поверхностного слоя, энергетического соответствия пространственно-временных характеристик отраженного сигнала различным видам дефектов и влияния характеристик зондирующих лазерных пучков (диаметра пятна, угла падения излучения, длины волны, интенсивности источника излучения) на результаты измерений.

Переотражение излучения в измерительной системе

Для выявления зависимости величины отраженного сигнала от параметров оптической системы (диаметра пятна, угла падения излучения, диаметра приемного объектива) и геометрических параметров дефекта рассмотрим изменение интенсивности зеркально отраженного излучения при сканировании по

поверхности с трещиной произвольного угла раскрытия 2γ .

При распространении излучения точечного источника в трещине (рис.1) и постоянном коэффициенте отражения,

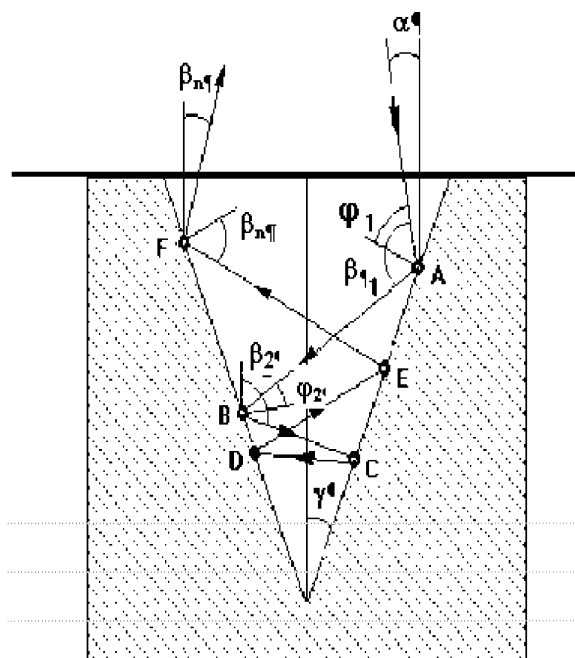


Рис. 1. Схема распространения излучения точечного источника в трещине.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma \\ \beta_1 &= 2\varphi_1 + \alpha = \pi - \alpha - 2\gamma \end{aligned} \quad (1)$$

из треугольника ABO:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{2} - \varphi_1 + \frac{\pi}{2} + \varphi_2 + 2\gamma &= \pi \\ \varphi_2 &= -2\gamma + \varphi_1 = -\alpha - 3\gamma + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} - \gamma + \varphi_2 = \pi - \alpha - 4\gamma$$

а для произвольного значения n:

$$\begin{aligned} \beta_n &= \pi - \alpha - 2n\gamma \\ \varphi &= \frac{\pi}{2} - \alpha - (2n-1)\gamma \end{aligned} \quad (3)$$

где α - угол падения излучения на исходную поверхность, φ_1 - угол падения излучения на поверхность трещины, β_1 - угол между отраженным поверхностью трещины излучением и вертикалью при первом отражении, φ_2, β_2 - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при втором отражении от поверхности трещины, φ_n, β_n - угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при выходе из трещины, γ - половина угла раскрытия трещины, n - число переотражений излучения.

Отметим, что после отражения от поверхности трещины излучение идет вниз, если $\varphi_n > 0$ вверх если $\varphi_n < 0$.

Соотношение углов α и γ , для которых направление распространения излучения на выходе из трещины, соответствует направлению зеркально отраженного от исходной поверхности излучения и определяется в случае $\beta_n = \alpha, \gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$. При падении излучения источника с квадратным сечением с равномерным распределением мощности на поверхность с трещиной, когда приемный объектив также имеет квадратное сечение со стороной B_2 и расположен под углом β к нормали к поверхности, значение x (смещение светового пятна относительно края трещины), при котором излучение, выходящее из трещины, попадает на приемный объектив, удовлетворяет неравенству:

$$H_2 \operatorname{tg} \gamma \langle x \langle H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha \quad (4)$$

где $H_2 = B_1$ - глубина трещины. Момент, при котором отраженное трещиной излучение начинает попадать на объектив, соответствует $x_1 = x$, тогда максимальное значение отраженного трещиной излучения попадает на приемный объектив при $x = 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$. Затем значение этой величины снижается и становится равным нулю, при $x = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha$.

Отношение величины сигнала W при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности W_0 , при $n=2$ для $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$ определяется выражением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\frac{B_1}{\cos \alpha} - x}{\frac{B_1}{\cos \alpha}} + \frac{A_2^2 (x - x_1)}{\frac{A_1 B_1}{\cos \alpha}} \quad (5)$$

а для $H_2 \operatorname{tg} \gamma \langle x \langle H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \operatorname{tg} \gamma}{\frac{B_1}{\cos \alpha}} + \frac{A_2^2 \left(x_2 - \left(x - \frac{B_1}{\cos \alpha} \right) \right)}{\frac{A_1 B_1}{\cos \alpha}} \quad (6)$$

где A_2 - коэффициент отражения поверхности трещины, A_1 - коэффициент отражения бездефектной поверхности. При этом доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине для соотношения углов $\gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$, определяется координатой пятна x и не зависит от высоты расположения объектива над поверхностью H_1 .

Аналогичная картина распространения излучения в трещине будет наблюдаться, при всех четных значениях n и неизменном значении ширины трещины. Условие $\beta_n = \alpha$ также выполняется при уменьшении угла раскрытия трещины. Координаты x_1 и x_2 имеют те же значения, что и для $n=2$, угол выхода излучения из трещины β_n соответствует углу β_2 при $n=2$. Значения W/W_0 определяются в соответствии с выражениями (5) и (6), во второе слагаемое вместо A_2^2 входит A_2^n . При уменьшении угла раскрытия трещины данное условие выполняется при $n=2$ и увеличении значений углов α и β_n . Для нечетных значений n излучение выходит из трещины в направлении источника.

Рассмотрим случай, когда половина угла раскрытия трещины увеличивается на $\Delta\gamma$ (рис.2) и определим характеристики пучка, выходящего после переотражения из трещины при прежнем значении угла падения излучения $\alpha=30^\circ$ и глубины трещины ($H_2 = B_1$).

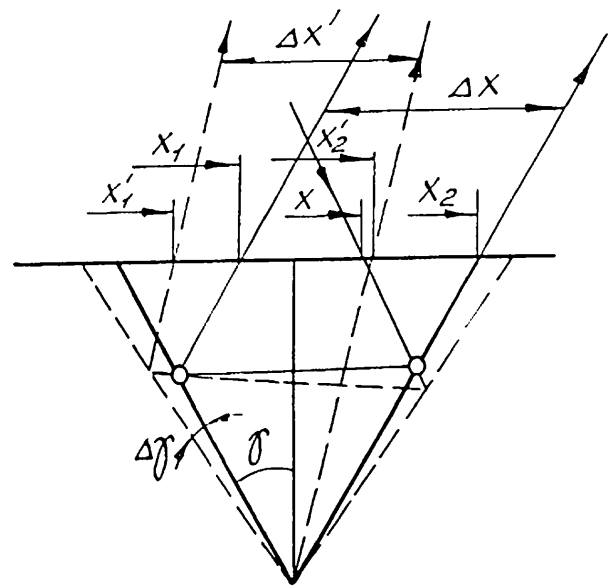
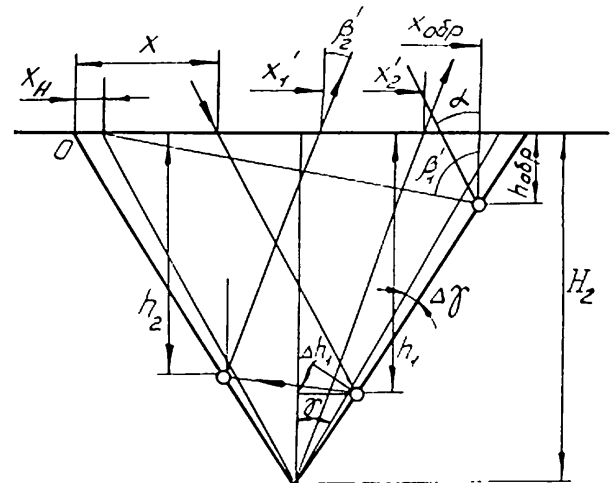


Рис. 2. Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на $2\Delta\gamma$ (а) и распространение излучения в трещинах с углами 2γ и $2(\gamma+\Delta\gamma)$ (б).

В соответствии с условием (3), излучение выходит из трещины под углом $\beta_2' = \beta_2 - 4\Delta\gamma$, $\beta_1' = \beta_1 - 2\Delta\gamma$, $\beta_1 = \pi/2 - 2\Delta\gamma$, а ширина выходящих из трещины пучков $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta x' = x_2' - x_1'$. Здесь знак "'" соответствует трещине с углом $\gamma + \Delta\gamma$. Если для трещины с углом γ все излучение, попадающее в трещину, выходит из нее под углом β_2 , то для трещины с углом $\gamma + \Delta\gamma$ под углом $\beta_2' = \beta_2 - 4\Delta\gamma$ распространяется излучение, попадающее в трещину при $x_n < x < x_{обр}$ имеет следующие параметры: $x_n = H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - \operatorname{tg}\gamma$, $S = 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$, $S/B_1 = 2\operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$. В частности, при $\Delta\gamma = 3^\circ$ $S/B_1 = 1,3$.

Определим значение $x_{обр}$ - координаты изменения направления сигнала:

$$\begin{aligned} x_{обр} + h_{обр} \operatorname{tg}\alpha + h_{обр} \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma) &= \\ = 2H_2 (\operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)), & \\ h_{обр} = (x_{обр} + h_{обр} \operatorname{tg}\alpha) \operatorname{ctg}\beta_1 & \quad (7) \end{aligned}$$

Тогда момент, когда излучение, выходящее из трещины, начинает попадать на приемный объектив, определится условием (рис.2):

$$\begin{aligned} D_1' < 0, D_1' = x_1' - x - & \\ - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha), & \\ x_1' - x < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \quad (8) \end{aligned}$$

Излучение, выходящее из трещины, полностью попадает на приемный объектив при условии:

$$\begin{aligned} D_2' < 0, D_1'' > 0, & \\ D_1'' = x_1' - x + \frac{B_1}{\cos\alpha} - & \\ - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \\ x_1' - \left(x - \frac{B_1}{\cos\alpha} \right) < & \\ < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \\ D_2' = x_2' - x - & \\ - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \\ x_1' - x < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2) \times & \\ \times (H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \quad (9) \end{aligned}$$

Излучение выйдет за границы приемного объектива при условии:

$$\begin{aligned} D_2' < 0, & \\ D_2' = x_2' - x + \frac{B_1}{\cos\alpha} - & \\ - (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \\ x_2' - \left(x - \frac{B_1}{\cos\alpha} \right) < & \\ < (\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta_2)(H_1 - 0,5B_1 \sin\alpha) & \quad (10) \end{aligned}$$

Соотношения (4), (5), (8) - (10) позволяют построить зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от значения координаты x .

Экспериментальные результаты

Для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей влияния формы трещины (угла раскрытия трещины и расположения плоскости симметрии трещины) на изменение интенсивности излучения, отраженного от поверхности использовался источник с равномерным распределением интенсивности излучения круглого сечения. Приемный объектив с круглым сечением устанавливался над исследуемой поверхностью на высоте H_1 , диаметр приемного объектива был равен диаметру источника излучения. Угол падения излучения составлял $\alpha = 30^\circ$. Угол α_2 определял расположение плоскости наблюдения относительно исследуемой поверхности и был равен 0, если плоскость наблюдения перпендикулярна направлению распространения зеркально отраженного излучения от бездефектной поверхности. Относительная ширина трещины для всех случаев была равна $S/D_2 = 1,15$. Относительная глубина трещины S/H_2 изменялась в диапазоне $S/H_2 = 0,65 \dots 1,44$, $S/H_2 = 0,65$ соответствовала $\gamma = 18^\circ$, $S/H_2 = 1,44$ соответствовала $\gamma = 35,8^\circ$ (S - ширина трещины, H_2 - глубина трещины). Как показывают измерения, при $\alpha_2 = 0^\circ$ и $\alpha = \gamma$ относительная величина сигнала не зависела от высоты расположения приемного объектива над поверхностью, и при всех значениях H_1 кривая имела один и тот же вид. Здесь введены обозначения: γ - угол раскрытия трещины, φ_1 - угол поворота плоскости симметрии трещины вокруг линии пересечения плоскости симметрии трещины с исходной поверхностью, φ_2 - угол наклона плоскости симметрии трещины к плоскости, перпендикулярной данной плоскости. При $S/D_2 > 1$ значения относительной величины сигнала W/W_2 не зависели от соотношения ширины трещины и диаметра пятна, вид кривой определялся конфигурацией трещины (значениями углов γ , φ_1 и φ_2). При $S/D_2 < 1$ для той же трещины значения относительной величины сигнала W/W_0 возрастали, при $S/D_2 \rightarrow 0$ $W/W_0 \rightarrow 1$ для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно (этот вывод вытекает из зависимостей математической модели). Максимальное значение относительной величины сигнала на поверхности трещины при $\alpha = \gamma$ соответствовало центру трещины ($x/D_2 = S/2D_2 + 1/2\cos\alpha$) и было равно при четном значении числа переотражений в трещине $W/W_0 = A^{(n-1)}$, где A - коэффициент отражения поверхности трещины, n - число переотражений в трещине. При нечетных значениях n и $n \rightarrow \infty$ ($n > 6, S/H_2 < 1$) $W/W_0 \rightarrow 0$ для указанного значения x/D_2 при $S/D_2 > 1$.

При уменьшении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещался в сторону приемного объектива. Величина максимума и его смещение за-

висели от угла раскрытия и глубины трещины, а также расстояния от поверхности до приемного объектива.

Заметим, что изменение положения плоскости наблюдений ($\alpha_2=0^0$) оказывает существенное влияние на форму кривой W/W_0 . Для $\alpha=\gamma=30^0$ так же, как и при $\alpha_2=0^0$, сохраняется значение относительной величины сигнала в максимуме и расположение максимума при всех значениях $\alpha_2=0^0$. Значение W/W_0 в точках, соответствующих прохождению центра пятна через края трещины ($x/D_2=0,577$ и $x/D_2=1,73$) снижается с ростом α_2 . Для трещин с углами $\alpha-\gamma$ характерно появление максимумов при $x/D_2=0,8...0,9$, значение W/W_0 в максимуме возрастает с ростом α_2 , при $x/D_2=1...1,6$ наблюдается минимум, значение W/W_0 в этой точке снижается с ростом α_2 . Для $\gamma=34^0$ максимальное значение $W/W_0=0,67$ при $x/D_2=0,9$ и $W/W_0=0$ при $x/D_2=1,5$ соответствуют $\alpha_2=75^0$. Для $\gamma=27^0$ и $\alpha_2=75^0$ максимальное значение $W/W_0=0,85$ при $x/D_2=0,83$, $W/W_0=0$ при $x/D_2=1,04$.

Проведенные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W/W_0 . При $H_1/D_2 \gg 1$ форма кривой не зависит от значений углов γ , φ_1 и φ_2 и определяется только шириной трещины S и соотношением ширины трещины и диаметра пятна S/D_2 . Соотношение S/D_2 не оказывает влияния на определение характера трещины при $S/D_2 > 1$. При $S/D_2 < 1$ для той же трещины значения относительной величины сигнала W/W_0 возрастают, при $S/D_2 \rightarrow 0$ $W/W_0 \rightarrow 1$ для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно. Поворот плоскости симметрии трещины (изменение величины угла φ_1) возможно выявить для неглубоких трещин ($S/H_2 > 1$) при $\gamma - (\pi/2 - \alpha)/n$ и $-5^0 < \varphi_1 < 5^0$. При большем угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла φ_1 не влияет на форму кривой, так как излучение, переотраженное поверхностью трещины не попадает на приемный объектив. Наклон плоскости симметрии трещины (изменение величины угла φ_2) также приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой сигнала измерений. Изменение положения плоскости наблюдения наиболее существенное влияние оказывает при $\gamma - (\pi/2 - \alpha)/n$. При $\alpha_2=0^0$ и $\varphi_1=0^0$ и $\varphi_2=0^0$ появляются максимум в левой части кривой ($x/D_2 < 1$) и минимум в правой части ($x/D_2 \rightarrow 1$), с ростом α_2 возрастает значение W/W_0 в максимуме и снижается значение W/W_0 в минимуме. Несмотря на большую чувствительность к изменению угла раскрытия трещины при $\alpha_2=0^0$, изменение ориентации плоскости наблюдения может привести к снижению разрешающей способности метода при $\alpha_2 \geq 45^0$, так как поворот плоскости наблюдения при неизменном значении размеров приемного объектива равносителен снижению его площади в плоскости $\alpha_2=0$.

Разработанное испытательное оборудование по обнаружению поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает в свой состав гелий-неоновый лазер ЛГИ-224-1 ($\lambda=0,6328$ мкм), стеклянную пластину для формирования опорного сигнала, два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов, плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения от источника к исследуемой поверхности и отраженного от поверхности излучения к фотоприемнику, устройство для перемещения образца. Величина опорного сигнала составляла $\sim 6\%$ от интенсивности источника излучения.

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, стеклотекстолита АФТ-2П. Профилограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе завода "Калибр" модели 250.

Как показали исследования, резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50...98% свидетельствует о наличии царапин, трещин и повреждения покрытий. Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефектов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта. Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей апертуры и шаг сканирования превышает размеры дефекта. Наибольшая вероятность распознавания дефекта достигается в том случае, если диаметр пятна излучения на поверхности не превышает размеров дефекта и равен шагу сканирования. Разброс величины сигнала W/W_0 увеличивается с ростом шероховатости поверхности. Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала W/W_0 с ростом координаты x/x_0 (образец из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла). Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины W/W_0 (образец из стеклотекстолита АФТ-2П; $Ra=7,45 - W/W_0=0,49$; $Ra=4,8 - W/W_0=1,1$).

Износ участка поверхности образца из титанового сплава ВТ14 характеризуется увеличением шероховатости и отклонением средней линии профиля, что соответствует снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца.

Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сигнала W/W_0 . Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из

стеклотекстолита). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин ($W/W_0 \approx 0,03$). Наличие воды на поверхности образца приводит к снижению среднего уровня сигнала W_0 , величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава ВТ14 слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца, в 2 раза. Наличие повреждения регистрируется так же, как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости.

Существенное уменьшение габаритов испытательного оборудования возможно при использовании полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения. Были проведены исследования их флуктуаций мощности, распределения плотности мощности и отклонения излучения в пространстве. Наиболее распространенными материалами для лазерных диодов являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем. Примерами таких лазеров являются GaAlAs/GaAl и AlGa-InP/InP лазерные диоды /3/. Преимуществами лазеров с четверной системой являются /4/: изопериодичность гетероструктуры и отсутствие температурных деформаций, связанных с несоответствием параметров решеток подложки и активной области; высокая оптическая прочность зеркал, отсутствие "дефектов темных линий", слабое участие дислокаций в процессе деградации и, вследствие этого, более высокая долговечность и выходная мощность; отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и большая стабильность оси диаграммы направленности.

По сравнению с другими типами лазерных диодов лазеры с квантоворазмерными структурами имеют в 3 раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области и окружающей среды. Как показали исследования, они характеризуются отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. Лазеры с квантоворазмерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты.

Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем.

Заключение

Таким образом, построена математическая модель, описывающая изменение относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 при сканировании по поверхности (B_1 - поперечное сечение источника излучения) при различных соотношениях значений углов α и γ (угла падения излучения и половины угла раскрытия трещины), когда размер поперечного сечения пучка и ширина трещины приблизительно равны (одного порядка), $\Delta\gamma < \gamma$. На участке поверхности с наличием трещины кривая изменения относительной величины сигнала имеет максимум или минимум в зависимости от глубины трещины. Угол раскрытия трещины, при котором имеется максимум на кривой, зависит от коэффициента отражения поверхности и угла падения излучения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W/W_0 . Поворот плоскости симметрии трещины возможно выявить лишь для неглубоких трещин ($S/H_2 > 1$) при $-5^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$, при большом угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла φ_1 не влияет на форму кривой. Наклон плоскости симметрии трещины приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой отраженного сигнала. Изменение положения плоскости наблюдения приводит к появлению дополнительных максимумов и минимумов. Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем. Для учета флуктуаций мощности источника излучения в процессе измерений необходимо формирование опорного канала.

Литература

1. Обнаружение поверхностных трещин оптическим сканированием // Испытательные приборы и стенды: Экспресс-информация. - 1988, N 14(59), с.1-8.
2. Кукса Н.Н. Влияние площади считывающей апертуры фотоэлектрического дефектоскопа на вероятность пропуска дефекта // Дефектоскопия. - 1984. - N 4. - с.57-64.
3. Басов Н.Г., Елисеев П.Г., Попов Ю.М. Достижения и проблемы физики инжекционных лазеров//Нелинейная оптика полупроводниковых лазеров. - М.: Наука, 1986, Тр. ФИАН; Т.166, с.3-14.
4. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т.1. М.: Мир, 1981.- 299 с.
5. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т.2. М.: Мир, 1981.- 364 с.