

Л. Н. ДЕРЮГИН, В. А. КОМОЦКИЙ, М. В. КОТЮКОВ  
(Москва)

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ С ОПОРНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Метод оптического зондирования поверхностных акустических волн (ПАВ) с опорной дифракционной решеткой (ОДР), который был предложен в [1, 2] и исследован в [3—6], в отличие от других методов, описанных в [7], позволяет просто и с высокой точностью измерять фазовые распределения ПАВ [4, 5]. В настоящей работе ставится задача изучения влияния различных факторов на результаты фазовых измерений и разработки рекомендаций для обеспечения наилучшей точности фазовых измерений.

Варианты зондирования представлены на рис. 1. ОДР может располагаться на поверхности звукопровода (рис. 1, а) либо на отдельной пластине на расстоянии  $l$  от поверхности звукопровода (рис. 1, б, в). Зондирование осуществляется либо на просвет (см. рис. 1, б), либо с отражением от поверхности звукопровода (см. рис. 1, а, в). Фотодетектор располагается в нулевом ( $m=0$ ) или в одном из первых ( $m=\pm 1$ ) порядков дифракции. Полезный сигнал — это составляющая фототока по частоте ПАВ  $F$ :

$$i^{(F)} = i_{\max}^{(F)} \cos(2\pi Ft + \varphi).$$

Амплитуда сигнала  $i_{\max}^{(F)}$  линейно связана с амплитудой ПАВ. Фазовый сдвиг  $\varphi$  зависит от расположения линий равной фазы ПАВ по отношению к линиям ОДР. Пусть ОДР жестко связана со звукопроводом, а зондирующий луч сканирует в направлении  $z$  вдоль штрихов ОДР и при этом регистрируется изменение фазы полезного сигнала  $\varphi(z)$  относительно фазы опорного сигнала частоты  $F$  с генератора. Тогда фазовое распределение ПАВ может быть найдено по формуле  $\theta(z) = (2\pi/\Lambda)g(z) - \varphi(z)$ , где  $x = g(z)$  — уравнение линии опорной решетки. В данном случае форма штрихов решетки определяет опорную линию зондирования, а неоднородности штрихов ОДР порождают ошибки измерения.

Возможен и другой вариант, когда ОДР отделена от звукопровода и остается неподвижной относительно зондирующего луча, а звукопровод перемещается независимо. Тогда опорной линией зондирования  $g(z)$  является линия движения оптического пучка по поверхности звукопровода, причем планируемая траектория  $g(z)$  — обычно прямая линия. Если фактическая траектория отличается от планируемой на  $\delta g(z)$  из-за неровностей в системе перемещения звукопровода, это приводит к ошибке измерения фазового фронта ПАВ, равной  $\delta\theta(z) = (2\pi/\Lambda)\delta g(z)$ . При такой

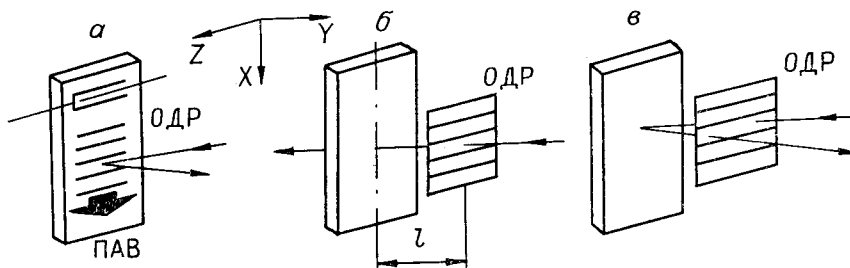
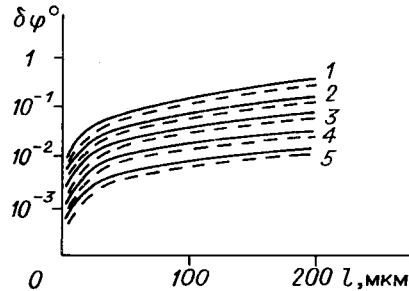


Рис. 1. Варианты зондирования

Рис. 2. Фазовые ошибки, связанные с угловой нестабильностью зондирующего луча в плоскости  $XOY$  при  $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$  рад в схеме на просвет (сплошные линии), и фазовые ошибки, обусловленные качаниями звукопровода в плоскости  $XOY$  в схеме на отражение при  $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-5}$  рад (штриховые линии) для различных длин ПАВ  $\Lambda$ :

кривые 1—5 соответствуют  $\Lambda = 10, 20, 40, 100, 200$  мкм



схеме требования к системе перемещения звукопровода будут ужесточаться с уменьшением  $\Lambda$ .

Рассмотрим ошибки вследствие угловой нестабильности зондирующего луча и люфта в системе сканирования. Из теоретического анализа [6] следует, что в схеме на просвет изменение угла падения зондирующего луча на систему ОДР — ПАВ в плоскости, перпендикулярной штрихам ОДР, на величину  $\Delta\alpha$  вызовет изменение фазы выходного сигнала на величину  $\delta\varphi \approx (2\pi/\Lambda)l\Delta\alpha$ , где  $l$  — расстояние между ОДР и звукопроводом. К такому же эффекту приведет поворот системы ОДР — ПАВ относительно луча в плоскости  $XOY$ , поскольку он вызывает смещение звукопровода относительно луча на величину  $l\Delta\alpha$ . Заметим, однако, что качания одного лишь звукопровода относительно оси  $z$  не дают изменения фазы, поскольку при этом звукопровод не смещается.

Для уменьшения ошибки, возникающей из-за угловой нестабильности луча, желательно располагать решетку вблизи звукопровода. На рис. 2 приведены расчетные зависимости величины этой ошибки от расстояния  $l$  в случае близкого расположения ОДР и звукопровода ( $l \ll \Lambda^2/\lambda$ ) при зондировании по схеме на просвет для типичной величины флуктуаций направления излучения газового лазера  $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$  рад. Для других оптимальных плоскостей расположения ОДР, например  $l = \Lambda^2/\lambda$  для фазовой ОДР либо  $l = 0,5\Lambda^2/\lambda$  для амплитудной ОДР, величина погрешности  $\delta\varphi$  при  $\Delta\alpha \sim 10^{-4}$  рад для  $\Lambda \geq 10$  мкм будет порядка  $1^\circ$  и более. Сравнительно большая величина ошибки вследствие угловой нестабильности луча — один из основных недостатков схемы на просвет.

Изменение угла падения зондирующего луча в плоскости, параллельной линиям ОДР, приводит к смещению точки пересечения зондирующего луча с ОДР вдоль линий решетки и к смещению точки зондирования по звукопроводу на  $\Delta z$ , при этом ошибка фазовых измерений возникает главным образом вследствие непараллельности линии ОДР и участка волнового фронта ПАВ вблизи точек зондирования; для малых углов  $\Delta\gamma$  между волновым фронтом и линией ОДР она равна  $\delta\varphi = (2\pi/\Lambda)\Delta\gamma\Delta zL$ , где  $L$  — расстояние от центра вращения луча до звукопровода.

В схеме на отражение с двукратным прохождением луча через ОДР ошибка вследствие угловой нестабильности луча в плоскости  $XOY$  в рассматриваемом приближении отсутствует, так как фаза считываемого сигнала остается постоянной в довольно широком диапазоне изменения углов  $\Delta\alpha$  [6], превышающем возможные значения угловой нестабильности зондирующего луча. Однако эта схема оказывается чувствительной к угловым качаниям отражающего звукопровода. Фазовая ошибка из-за качания на угол  $\Delta\beta$  в плоскости  $XOY$  составит  $\delta\varphi = (4\pi/\Lambda)l\Delta\beta$ , а ее величина иллюстрируется графиками на рис. 2.

Рассмотрим фазовые ошибки, возникающие в фотодиодном узле (ФДУ) (рис. 3). Особенность работы ФДУ в данной схеме состоит в том, что он регистрирует малые гармонические колебания интенсивности на фоне большой постоянной составляющей светового потока. Ранее показано, что для увеличения отношения сигнал/шум на выходе ФДУ в качестве нагрузки фотодиода выгодно использовать резонансную нагрузку,

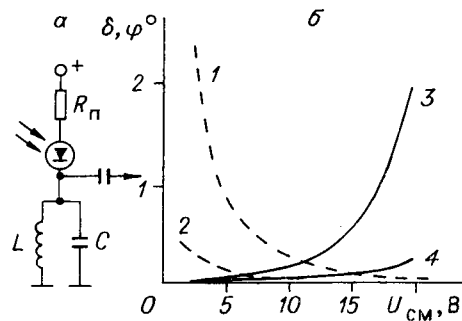


Рис. 3. Схема ФДУ (а) и величина скачка фазы при скачке оптической мощности на 25% в зависимости от напряжения постоянного смещения на фотодиоде (б):

кривая 1:  $p-i-n$ -фотодиод,  $R_{вн} = 300 \text{ Ом}$ ,  $R_{П} = 3,3 \text{ кОм}$ ;  
 кривая 2:  $R_{П} = 0$ ; кривая 3: ЛФД,  $\delta F/F = 10^{-3}$ ; кривая  
 4: ЛФД,  $\delta F/F = 10^{-4}$

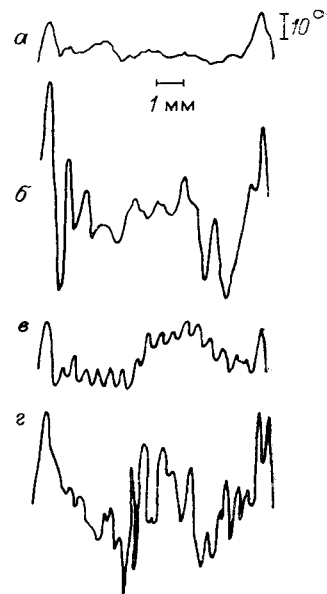


Рис. 4. Фазовые распределения ПAV от одного и того же преобразователя, полученные в различных вариантах схем измерения

например  $LC$ -контур, настроенный на частоту  $F$ . При фазовых измерениях обнаружено, что флуктуации оптической мощности зондирующего излучения вызывают при определенных условиях значительные скачки фазы сигнала на выходе ФДУ. Экспериментальным и расчетным путем выявлено два механизма возникновения этих скачков. Первый из них связан с изменением емкости фотодиода из-за скачков напряжения на  $p-n$ -переходе. Действительно, скачок оптической мощности  $\Delta P_0$  вызовет скачок фототока  $\Delta i$  и скачок падения напряжения во внутреннем сопротивлении  $R_{вн}$  источника питания  $\Delta U = \Delta i R_{вн}$  либо  $\Delta U = \Delta i (R_{вн} + R_{П})$  при наличии последовательного ограничительного сопротивления  $R_{П}$  в цепи питания фотодиода, а следовательно, и изменение емкости  $p-n$ -перехода, что, в свою очередь, приведет к изменению фазовой характеристики нагрузки. На рис. 3 представлены расчетные зависимости величины фазового скачка от напряжения обратного смещения  $p-i-n$ -фотодиода для случая, когда в нагрузке использовался одиночный  $LC$ -контур (кривые 1 и 2). Как видно, для уменьшения фазовых скачков следует увеличивать напряжение обратного смещения на  $p-i-n$ -фотодиоде. При правильном выборе параметров можно обеспечить фазовую стабильность ФДУ выше  $0,1^\circ$ .

В случае использования лавинного фотодиода (ЛФД) проявляется, кроме того, еще один механизм возникновения фазовых скачков. Вследствие вариации мощности зондирующего пучка меняется не только емкость  $p-n$ -перехода, но и коэффициент лавинного умножения, что приводит к изменению динамического сопротивления фотодиода  $R_{д} = \partial U / \partial i$  и наклона фазовой характеристики  $LC$ -контура в полосе пропускания. При условии, что частота настройки контура отличается от частоты сигнала, скачок динамического сопротивления ЛФД приведет к скачку фазы выходного сигнала, причем знак скачка фазы определяется знаком расстройки контура. На рис. 3 (кривые 3, 4) даны расчетные зависимости величины скачка фазы от напряжения обратного смещения ЛФД  $U_{см}$  и расстройки нагрузочного контура  $\delta F$ . Зависимости на рис. 3 рассчитаны на основе экспериментальных измерений скачков добротности контура. Из-за значительных нестабильностей фазы при флуктуациях оптической мощности применение ЛФД в схемах, предназначенных для фазовых измерений, нежелательно.

**Эксперимент.** С целью сравнения различных методик измерения была проведена серия экспериментов. В одном из них использовался макет

на подложке из кварца  $y$ -среза. Встречно-штыревой преобразователь с апертурой 10 мм содержал 50 пар штырей ( $\Lambda = 100$  мкм). Для измерений по схеме на отражение на звукопровод наносилась отражающая площадка из пленки алюминия, фотодетектор располагался в отраженном пучке. При измерениях по схеме на просвет оптический луч проходил через прозрачный участок подложки и направлялся на фотодетектор. ОДР либо приклеивалась к звукопроводу с небольшим зазором (менее 100 мкм), либо могла быть установлена независимо на любом расстоянии от звукопровода, причем существовала возможность контролировать с высокой точностью параллельность штрихов ОДР и линий ВШП. Зондирующий пучок можно было фокусировать длиннофокусной линзой в пятно порядка 0,5 мм для обеспечения достаточно высокой разрешающей способности измерений по плоскости звукопровода. Для измерений использовался фазометр Ф5126 с разрешающей способностью  $0,1^\circ$ . Ряд распределений, полученных при исследовании поля от одного и того же преобразователя с использованием различных схем, представлен на рис. 4. Распределение (а) получено в схеме на отражение с ОДР, жестко связанной со звукопроводом при  $l = 0,1$  мм. Распределение (б) — в схеме на отражение с неподвижной ОДР и перемещаемым звукопроводом при  $l = 0,1$  мм. Здесь заметна паразитная периодическая составляющая с амплитудой  $\Delta\varphi = 4^\circ$  и периодом 0,5 мм, равным шагу микровинта, перемещающего звукопровод. Установлено, что она вызвана механическими смещениями звукопровода по оси  $Ox$  при поступательном движении звукопровода вдоль  $Oz$ . Если пересчитать  $\Delta\varphi$  в амплитуду поперечных смещений звукопровода, вносимых винтом, то последняя оказывается равной 2,2 мкм. Распределение (в) получено в схеме на просвет с ОДР, жестко связанной со звукопроводом, при  $l = 0,1$  мм. Заметны существенные отклонения этого распределения от распределения (а), обусловленные влиянием объемных волн от возбудителя ПАВ. Распределение (г) реализовано в схеме на просвет с неподвижной ОДР и перемещаемым звукопроводом. Сильные отклонения от распределения (а) обусловлены совместным действием обоих факторов, упомянутых выше, а именно объемными волнами и несовершенством механизма перемещения. Фактор влияния объемных волн можно было выделить и изучить отдельно. Для этого на пути возбудителя до точки зондирования поверхностная волна гасилась введением поглотителя. Тем не менее в схеме на просвет наблюдался сигнал на уровне  $-20$  дБ, а зависимость фазы от координаты носила немонотонный характер со скачками фазы  $\sim 100^\circ$ . При использовании схем на отражение подавление ПАВ приводило к полному исчезновению сигнала. Отсюда можно сделать вывод, что распределение, полученное в схеме на отражение, не подвержено влиянию объемных волн и, следовательно, более достоверно, чем распределение, полученное в схеме на просвет.

**Заключение.** Предложенная методика фазовых измерений фронтов ПАВ с помощью оптического зондирования с ОДР может обеспечивать измерение фазовых распределений ПАВ с разрешающей способностью порядка  $1^\circ$ . Эксперименты проводились на частотах в районе 15, 30 и 80 МГц и подтвердили получение стабильных, воспроизводимых и достоверных результатов. На более высоких частотах некоторые виды ошибок измерения резко возрастают, поэтому использование предложенной методики требует дополнительных исследований. Данная методика пригодна для исследования характеристик распространения ПАВ на участках, покрытых дополнительными слоями, и для обнаружения дефектов звукопровода [9]. Для точных фазовых измерений предпочтение следует отдать схемам с отражением света от звукопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Явление при дифракции оптической волны с движущейся пространственной фазовой модуляцией на фазовых стационарных решетках // Оптика и спектроскопия.— 1980.— Т. 49, вып. 1.

2. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Оптическое зондирование поверхностей // 1983.
5. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Измерение фазовых распределений поверхностных акустических волн методом оптического зондирования с опорной решеткой // Автометрия.— 1982.— № 5.
6. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Анализ взаимодействия световой волны с системой пространственно разнесенных периодических структур при оптическом зондировании ПАВ // Оптика и спектроскопия.— 1984.— Т. 56, вып. 6.
7. Stegeman G. I. Optical probing of surface waves and surface wave devices // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics.— 1976.— V. SU-23, N 1.
8. Акустические кристаллы: Справочник/Под ред. М. П. Шаскольской.— М.: Наука, 1982.
9. Bessonov A. F., Black T. D., Deryugin L. N. et al. Theory, experimental realization and applications of SAW optical probing with diffractive reference gratings // Proc. of the Internat. Symposium Surface Waves in Solids and Layered Structures.— Novosibirsk, USSR.— 1986.— V. II.— P. 202.

*Поступила в редакцию 7 апреля 1986 г.*

УДК 681.3 : 519.6

М. А. БЕРЕЗОВСКИЙ, А. Л. МИНКИН

(Москва)

## ОПТИМИЗИРУЮЩИЙ ПРЕПРОЦЕССОР ПРОГРАММ НА ФОРТРАНЕ ДЛЯ МАТРИЧНОГО ПРОЦЕССОРА А-12

Опыт численного решения больших задач на ЭВМ со специализированными процессорами параллельной архитектуры [1—3] показывает существенное увеличение трудозатрат на программирование в качестве платы за повышение производительности. По-видимому, дальнейшее расширение использования таких вычислительных комплексов будет в значительной степени определяться наличием эффективных методов и средств автоматизации программирования, в первую очередь компиляторов для языков высокого уровня, способных распараллеливать (или векторизовать) пользовательские программы.

При программировании параллельных ЭВМ различают проблемно ориентированный и машинно-ориентированный подходы к распараллеливанию. При первом подходе выявление присущего задаче параллелизма и учет его в программе возлагаются на пользователя. Во втором подходе распараллеливание производится ЭВМ на стадии компиляции.

Данная работа посвящена созданию средств автоматического распараллеливания в фортрановских программах применительно к матричному процессору А-12 (МП) [4]\*.

МП подключается к основной ЭВМ в качестве дополнительного вычислительного средства. Он содержит в себе два арифметических устройства с плавающей запятой: умножитель и сумматор. В силу конвейерности обоих процессирующих устройств наибольшая эффективность работы МП достигается при условии непрерывности потоков данных,

\* Процессор А-12 архитектурно близок и программно совместим с процессорами АР-120В [3], ЕС 2706, ИЗОТ 2001С [5], «Электроника МТ-70М» [6].