

Рисунок 2 – Зависимость эффективности дифракции  $\eta$  от параметра отстройки частоты ультразвука  $f_s$  от брэгговской  $\Delta f$  при различных значениях параметра заполнения ФК  $f$ : 1-0, 2-0,2, 3-0,5, 4-1

( $n_1 = 1,51, n_2 = 3,43$ ;  $l=5$  см,  $h=1$  мм,  $\lambda = 3$  мкм,  $v_g = 7600$  м/с,  $P_a=10$  Вт,  $f_0=81$  МГц,  $\alpha=1^\circ$ );

а). ТЕ-ТЕ-преобразование, б). ТМ-ТМ-преобразование)

Расчеты, представленные на рис. 2, показывают, что наибольшая полоса АО модуляции  $\Delta f_{1/2}$  по уровню 3 дБ достигает для ТМ-ТМ- преобразования  $\Delta f_{1/2} \approx 4,3$  МГц: для ТЕ-ТЕ- преобразования она составляет  $\Delta f_{1/2} \approx 3,1$  МГц. Для светового пучка шириной  $w=5$  см. Время прохода звукового пучка через апертуру светового пучка ( $\tau = w/v$ ) составляет  $\tau=6,5$  мкс. Разрешающая способность АО дефлектора  $N = \Delta f_{1/2} \tau$ . В случае дифракции при ТМ-ТМ- преобразовании разрешающая способность дефлектора составляет 28 (для  $\tau=65$  мкс она составит  $N=280$ ). Аналогично этому для ТЕ-ТЕ преобразования разрешающая способность составляет 20 (для  $\tau=65$  мкс она составит  $N=200$ ).

#### Список использованных источников

1. Белокопытов, Г. В. Акустооптическая эффективность двумерных фотонных кристаллов / Г. В. Белокопытов, З. А. Пятакова // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, В. 1. – С. 3–10.
2. Балакший, В.Н. Физические основы акустооптики / В. Н. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.
3. Акустические кристаллы : справочник / А. А. Блистанов [и др.] ; под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Наука, 1986. – 629 с.

УДК 534.8: 535.42

Г. В. КУЛАК<sup>1</sup>, П. И. РОПОТ<sup>2</sup>, О. В. ШАКИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup> УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина» (г. Мозырь, Беларусь)

<sup>2</sup> ГНУ «Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Беларусь)

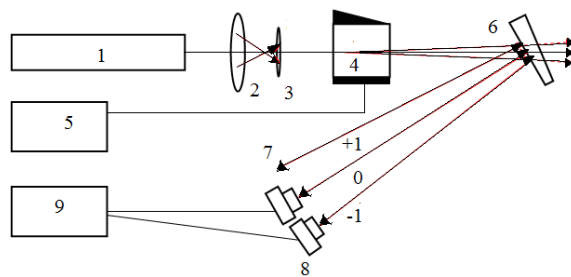
<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (г. Санкт-Петербург, Россия)

#### НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА

В настоящее время значительный интерес исследователей и разработчиков представляет исследование особенностей преобразования и управления поляризационными и энергетическими параметрами световых пучков акустооптическими (АО) методами [1]. Установлено, что при дифракции света на медленной сдвиговой ультразвуковой (УЗ) волне в кристаллах парателлурита для излучения с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм при увеличении интенсивности света  $I_0$  от 10 МВт/см<sup>2</sup> до 240 МВт/см<sup>2</sup> эффективность брэгговской дифракции увеличивается в 1,7 раза [2].

В настоящей работе исследованы особенности брэгговской АО дифракции гауссовых и бесселевых интенсивных световых пучков в одноосных гиротропных кристаллах кварца.

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки для исследования акустооптической (АО) дифракции мощных световых пучков на ультразвуке.



1 – импульсный лазер; 2,3– сферические линзы; 4 – АО ячейка; 5 – генератор стабильного тока; 6 – клиновидная пластинка; 7,8 – пьезоэлектрические приемники; 9 – измеритель мощности

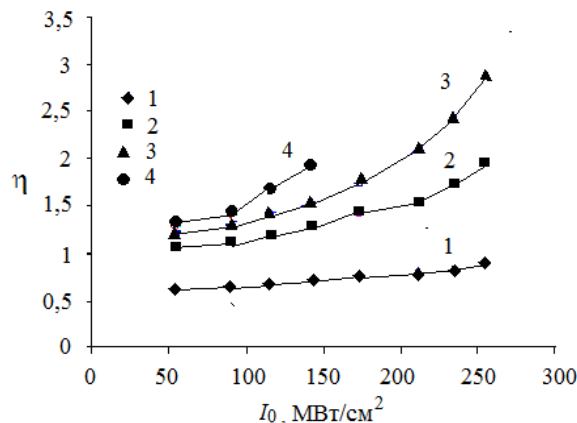
**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования дифракции мощного лазерного излучения**

Целью работы было экспериментальное исследование зависимости стоксовой и анти-стоксовой АО дифракции мощного лазерного излучения в кристаллах кварца от интенсивности света и ультразвука. АО ячейка была изготовлена из синтетического кварца высокого оптического качества размером  $40 \times 10 \times 35 \text{ мм}^3$ . Пьезопреобразователь обеспечивал резонансную частоту возбуждения 50 МГц. Длина АО взаимодействия составляла 40 мм. Верхняя часть звукопровода изготавливалась со скосом и имела дополнительно поглотитель звука. Пьезопреобразователь питался от генератора стабильного тока ГСТ-1, что наряду с конструкцией самой АО ячейки обеспечивало стабильность акустических параметров во времени. Температура звукопровода стабилизировалась термостатом.

В экспериментах использован импульсный твердотельный лазер на АИГ:  $\text{Nd}^{8+}$  (LS-2137 фирмы Lotis ТП) с преобразованием длины волны, работающий в частотном режиме. Для удобства юстировки оптической схемы работа проводилась на второй гармонике ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ ). Лазер генерировал импульсы длительностью 15 нс (по уровню 0,5) с частотой 1 Гц. Энергия импульса при максимальной накачке на длине волны 532 нм составляла 300 мДж. Диаметр пучка лазерного излучения на выходе составлял 9 мм при расходимости 0,5 мрад. Поляризация излучения – линейная.

Для получения высоких интенсивностей лазерный пучок фокусируется телескопической системой, образованной двумя сферическими линзами с фокусными расстояниями  $f_1 = 300 \text{ см}$  и  $f_2 = -100 \text{ см}$ . Отрицательная линза применена для исключения точки фокусировки, где при пролете пыли в воздухе возникает пробой. Определение эффективности дифракции осуществлялось по отношению интенсивности первого «1» порядка дифракции к интенсивности прошедшего излучения в нулевой «0» порядок дифракции излучения. Измерение интенсивностей пучков при дифракции и их отношения проводилось двухканальным прибором Laserstar фирмы Ophir с двумя пьезоэлектрическими головками типа PE-25. На экран прибора выводилась интенсивность в каждом из каналов и их отношение (эффективность дифракции) в реальном масштабе времени. Прибором проводилось автоматическое усреднение по десяти импульсам. Для оценки погрешности измерений проводилась серия измерений. Результаты экспериментов приведены ниже на рис. 2 для гауссового пучка (ГП). Для оценки интенсивности пучка, дифрагировавшего на УЗ волне, при различных мощностях накачки лазера была измерена интенсивность пучка на выходе АО ячейки (с учетом потерь в оптической схеме на отражения от двух линз и передней грани АО ячейки) в отсутствие дифракции. Интенсивность лазерного пучка измерялась пьезоэлектрической головкой PE-50 ДИФ, а оценка диаметра пучка проводилась с помощью специальной фотобумаги.

На рис. 2 приведена зависимость эффективности дифракции  $\eta = I_{1+} / I_0$ , где индекс снизу – порядок дифракции. Графики приведены для трех различных интенсивностей УЗ волны  $I_a$ , причем  $I_{a1} < I_{a2} < I_{a3}$ . Точное значение акустической интенсивности определить не представлялось возможным из-за отсутствия необходимого оборудования.



**Рисунок 2 – Зависимость эффективности дифракции  $\eta$  от интенсивности лазерного пучка**

При дифракции мощных бесселевых световых пучков (БСП), с использованием аксикона с углом при основании около одного градуса было получено только четыре точки (кривая 4) на невысоких интенсивностях света  $I_0$  и при максимальной акустической мощности (соответствует акустической мощности график 3 на рисунке 2 для гауссового пучка). Измеренные четыре точки для БСП приведены на рис. 2 (кривая 4). Далее, при более высоких мощностях света, наблюдается повреждение аксикона, а в АО ячейке наблюдается нитевидный микроканал серого цвета и происходит заметное искажение лазерного пучка.

#### Список использованных источников

1. Поляризационно-независимая акустооптическая модуляция бесселевых световых пучков / В. Н. Белый [и др.] // Опт. и спектр. – 2016. – Т. 121, № 3. – С. 458–465.
2. Проклов, В. В. Исследование дифракции мощного лазерного излучения в  $\text{TeO}_2$  / В. В. Проклов [и др.] // Краткие сообщения по физике. Труды ФИАН. – 1979. – С. 1543–1545.

УДК 681.3

А. Е. ЛЮЛЬКИН

УО «Белорусский государственный университет» (г. Минск, Беларусь)

#### ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ КМОП-СХЕМ

Известно [1–2], что моделью константных неисправностей на уровне функциональных элементов либо невозможно непосредственно описать ряд физических дефектов, характерных для КМОП-схем, либо применение такой модели требует определенного искусства и приводит к преобразованию исходной схемы в значительно более сложную схему, т.е. неэффективно. Это ограничивает использование известных методов построения тестов, ориентированных на константные неисправности в схемах из функциональных элементов. В частности, в КМОП-схемах существуют неисправности типа обрыва транзистора, которые невозможно проверить одним входным набором, но можно проверить последовательностью из двух наборов  $T=(u, t)$ . Входной набор  $t$  является проверяющим и переводит выход исправной схемы в определенное состояние 0 или 1, а выход схемы с неисправностью оказывается отключенным от источников сигналов, т.е. находится в состоянии высокого импеданса. Набор  $u$  используется для установки выхода схемы в состояние, противоположное определенному состоянию выхода, полученному на наборе  $t$ . Учитывая, что определенное значение сигнала на выходе схемы в состоянии отключения выхода от источников сигналов сохраняется в течение довольно длительного промежутка времени, достаточного для его контроля, последовательность  $T$  позволяет проверить неисправность.

К настоящему времени разработаны достаточно эффективные направленные методы построения тестовых последовательностей для неисправностей типа обрыва транзистора в полностью комплементарных схемах, включающих только  $p$ - и  $n$ -каскады [1,2]. В то же время представление всей логической КМОП-схемы на уровне транзисторов резко увеличивает размерности различных задач, которые необходимо решить в процессе построения теста. Указанную проблему можно преодолеть, используя иерархический подход к построению теста. Данный подход предполагает представление КМОП-схемы в целом на уровне функциональных элементов. В то же время при нахождении тестовых последовательностей для неисправностей типа обрыва транзистора в функциональных элементах используется их представление на переключательном уровне (уровень транзисторов). В этом случае возможно совместное использование методов построения тестовых последовательностей для неисправностей типа обрыва транзистора в функциональных элементах, представленных на переключательном уровне, и методов построения тестов для константных неисправностей в схемах, представленных на уровне функциональных элементов (в частности, широко распространенного  $D$ -алгоритма [3]). В настоящей работе понятие  $D$ -куба неисправности, используемое в  $D$ -алгоритме, распространяется на тестовые последовательности для неисправностей типа обрыва транзистора. Показывается возможность применения основных операций, используемых в  $D$ -алгоритме (операция расширения фиксации, нахождение условий транспортировки неисправности к выходам схемы), для построения установочных и проверяющих наборов неисправностей типа обрыва транзистора. Исследуется возможность проверки неисправностей типа обрыва транзистора в функциональных элементах, представляющих собой полностью комплементарные МОП-схемы, тестами для константных неисправностей на входах и выходах таких элементов. На примере схем, построенных в базисе И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, показывается возможность формирования теста для схемы в классе неисправностей типа обрыва транзистора из теста для константных неисправностей функциональных элементов. В заключение обсуждается задача минимизации длины построенного теста с использованием моделирования неисправностей и свойств тестовых последовательностей для неисправностей типа обрыва транзистора.

Построение проверяющих наборов для логических неисправностей с помощью  $D$ -алгоритма предполагает последовательное решение двух задач: 1) нахождение условий проявления неисправности в месте возникновения, т.е. поиск входного воздействия для функционального элемента, неисправность которого рассматривается, при котором выходная реакция элемента будет зависеть от наличия неисправности ( $D$ -куб неисправности); 2) нахождение условий транспортировки неисправности от места возникновения до одного из выходов схемы.