

ской структуры пассивных проводников можно возбуждать МСР с волновым вектором, лежащим в плоскости, перпендикулярной проводникам, проекция его на плоскость образца кратна величине  $2\pi/\Delta$ , где  $\Delta$  — период возбуждающей структуры.

### Список литературы

- [1] *Tittmann B. R.* // Sol. St. Commun. 1973. Vol. 13. N 4. P. 463—466.
- [2] *Storey B. E., Tooke A. O., Cracknell A. P., Przystawa J. A.* // J. Phys. C. 1977. Vol. 10. N 6. P. 875—888.
- [3] *Reiman H., Waldner F.* // IEEE Trans. Magn. 1973. Vol. MAG-15. N 6. P. 1720—1725.
- [4] *Kondal S. C., Seeha M. S.* // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 22. N 11. P. 5483—5489.
- [5] *Barak J., Ruppin R., Suss J.* // Phys. Lett. 1985. Vol. 108A. N 8. P. 423—425.
- [6] *Данилов В. В., Костенко В. И., Нечипорук Ю. А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 19. Вып. 18. С. 1146—1149.
- [7] *Rodbell D. S.* // J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. N 11. P. 1845—1846.
- [8] *Адам Дж. Д., Дэниэл М. П., Шродер Д. К.* // Электроника. 1980. Т. 53, № 11. С. 36—44.
- [9] *Damon R. W., Eshbach J. R.* // J. Phys. Chem. Sol. 1961. N 3/4. P. 308—320.
- [10] *Крышталъ П. Г., Медведь А. В.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 12. С. 2399—2402.

Институт физики им. Л. В. Киренского СО АН СССР  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
23 декабря 1987 г.  
В окончательной редакции  
13 мая 1988 г.

06; 08

Журнал технической физики, т. 59, в. 9, 1989

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Ю. К. Калининков, Л. Я. Стаценко

Перестраиваемые акустооптические (АО) фильтры в последнее время находят все более широкое применение в различных оптических и радиотехнических системах [1]. Относительно большая угловая апертура, особенно у фильтров со средним спектральным разрешением, позволяет осуществлять спектральную фильтрацию оптических изображений [2].

В данной работе приведены теоретические оценки и результаты экспериментального исследования фильтрации оптических изображений с помощью неколлинеарного АО фильтра на кристалле парателлурита. В отличие от работы [2] учтена дисперсия угла отклонения и показано, что этот эффект существенным образом влияет на угловое разрешение элементов отфильтрованного изображения.

В схемах фильтрации Фурье-образа изображений пространственное разрешение определяется степенью расходимости световых пучков, фокусируемых выходной линзой. Кроме дифракционной расходимости световых пучков, обусловленной ограниченностью входной апертуры, в этих схемах имеет место расходимость дифрагированных пучков, связанная с частотной зависимостью угла дифракции излучения в АО ячейке. Различным компонентам углового спектра падающего пучка белого света при этом будут отвечать разные частоты синхронизма и разные направления распространения после дифракции. Это приводит, во-первых, к растяжению пучка в плоскости взаимодействия света и звука, во вторых, к спектральной неоднородности пучка по сечению. Как видно из рис. 1, расходимость дифрагировавшего пучка пропорциональна расходимости звука  $\Delta\varphi = \beta\Delta\gamma$ , где  $\beta = 1 - n_e^* \cos \gamma / n_o \cos(\gamma + \varphi)$ . После подстановки в качестве  $\Delta\gamma$  дифракционной расходимости ультразвука и с учетом малости скосов граней кристалла в большинстве конструкций получим формулу для расходимости дифрагировавшего пучка вне АО ячейки

$$\Delta\varphi_\lambda = \left(1 - \frac{n_e^* \cos \gamma}{n_o \cos(\gamma + \varphi)}\right) \frac{n_o \Delta}{D}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — длина акустической волны,  $D$  — апертура пьезопреобразователя,  $n_o$  — показатель преломления для обыкновенного луча света,  $n_e$  — показатель преломления необыкновенного луча для данного направления распространения.

В то же время в плоскости, перпендикулярной плоскости взаимодействия, рассмотренный эффект отсутствует, что и определяет значительную асимметрию сечения пучка. Оценим величину этой асимметрии для использованного в эксперименте неколлинеарного АО фильтра на кристалле  $\text{TeO}_2$ , который имел следующие характеристики: световая апертура  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , рабочий диапазон длин волн 480—850 нм, длина пьезопреобразователя в плоскости взаимодействия  $D=7 \text{ мм}$ . На длине волны  $\lambda=500 \text{ нм}$  расходимость, обусловленная дисперсией угла АО дифракции,  $\Delta\varphi_\lambda=5 \cdot 10^{-4}$  существенно превышает дифракционную расходимость  $\Delta\varphi_d=7.5 \cdot 10^{-5}$ , определяемую диаметром диафрагмы  $d=8 \text{ мм}$ .

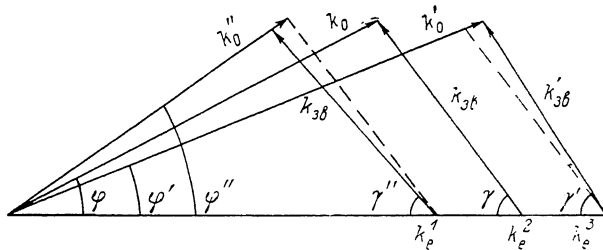


Рис. 1. Диаграмма волновых векторов при дифракции излучения разных длин волн.

Этот эффект может оказаться существенным и при фильтрации самого изображения, даже когда оно фокусируется внутри АО ячейки или вблизи нее. Максимальное размытие каждой точки в этом случае можно оценить величиной  $\Delta x=l_3=\Delta\varphi_\lambda$ , где  $l_3=l/n_{cp}$  — эквивалентное расстояние от фокуса до более удаленного края АО взаимодействия. С этой точки зрения оптимальным местом фокусировки является середина акустического столба. Оценки показывают, что при  $l_3=1 \text{ см}$ ,  $\lambda=750 \text{ нм}$  размытие достигает величины  $\Delta x=8 \text{ мкм}$ , что сравнимо с теоретическим пределом разрешения  $\Delta x_d=\lambda/\Delta\theta=7.5 \text{ мкм}$ , определяемым угловой апертурой АО фильтра  $\Delta\theta$  [2].

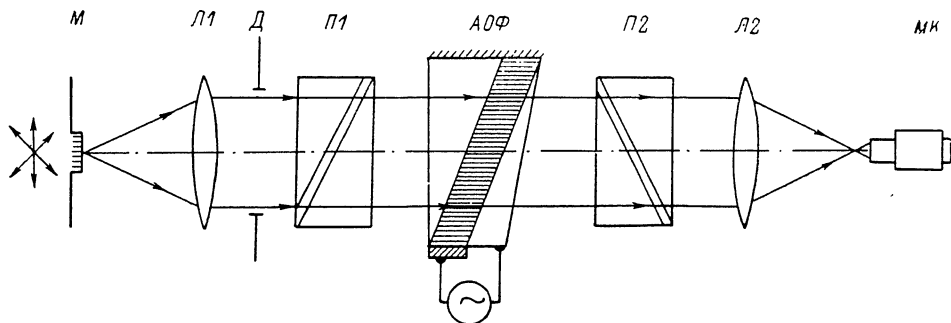


Рис. 2. Оптическая схема исследования качества фильтрации Фурье-образа изображения. Л1, Л2 — линзы, П1, П2 — поляризаторы; М — мира; D — диафрагма; АОФ — акустооптический фильтр; МК — микроскоп.

Проверка полученных результатов проводилась по стандартной методике с использованием оборудования оптической скамьи ОСК-2 по схемам, представленным на рис. 2, 3. Подсветка эталонных мир производилась мощным источником белого света. Расстояние между вполне различными вертикальными и горизонтальными штрихами мир пересчитывались в угловые меры через параметры объективов скамьи.

Эксперименты с хорошей точностью подтвердили теоретические оценки. Так, в режиме фильтрации Фурье-образа изображений расходимость в плоскости АО взаимодействия  $\Delta\varphi_{\parallel}=\approx 6 \cdot 10^{-4} \approx \Delta\varphi_\lambda + \Delta\varphi_d$ , а в перпендикулярном направлении  $\Delta\varphi_{\perp}=1 \cdot 10^{-4} \approx \Delta\varphi_d$ . На длине волны  $\lambda=750 \text{ нм}$  численные оценки и результаты измерений выглядят следующим образом:  $\Delta\varphi_\lambda=\approx 8 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta\varphi_d=1.1 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta\varphi_{\parallel}=\approx 9 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta\varphi_{\perp}=\approx 1.5 \cdot 10^{-4}$ . Некоторое уменьшение разрешения в поперечном направлении по сравнению с дифракционным пределом может быть объяснено небольшим наклоном мир относительно граней АО фильтра и возрастанием влияния погрешности оптических элементов оптической системы.

В режиме фильтрации самого изображения исследован важный для практики случай фокусировки за фильтром на расстоянии 20 мм, что соответствовало  $l_3=10 \text{ мм}$ . Обнаружена

разница в разрешении в плоскости взаимодействия и в перпендикулярном ей направлении. Расстояние между вполне различными штрихами наблюдалось непосредственно микроскопом, а более точное значение вычислялось через параметры микроскопа и объективов. Для  $\lambda = 750$  нм разрешение составило 18 мкм в плоскости взаимодействия и 10 мкм в поперечном направлении. Отличие от расчетных величин, составляющих 16 и 7.5 мкм соответственно, обусловлено качеством микроскопа и других элементов данной схемы.

Ограничение разрешающей способности при фильтрации изображений с помощью неколлинеарных АО фильтров, особенно в режиме фильтрации Фурье-образа, препятствует использованию последних в оптических системах высокого разрешения. В режиме фильтрации самого изображения можно получить более хорошие результаты при фокусировании его в центр области АО взаимодействия, когда изображение переносится на экран или фотоприемник дополнительной линзой. Системы фильтрации Фурье-образа изображения имеют, однако, свои преимущества, в частности такие, как удобство совмещения полей зрения нескольких фильтров и возможность применения единой оптической схемы для нескольких фильтров.

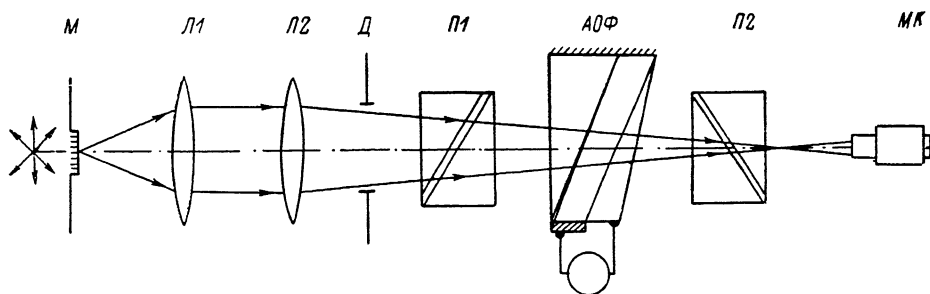


Рис. 3. То же, что и на рис. 2.

Ограничение разрешающей способности в этих системах из-за указанных эффектов может быть снято в схеме с последовательной анизотропной дифракцией в двух неколлинеарных фильтрах. В этой схеме продифрагировавший в первой АО ячейке пучок выделяется поляризатором и, дифрагируя во второй ячейке, приобретает свою исходную поляризацию и исходное направление распространения. При этом вторая ячейка обеспечивает компенсацию дисперсии угла дифракции, а также его «дрейфа», вызванного спектральной зависимостью показателей преломления, который приводит к изменению масштабов отфильтрованного изображения для разных спектральных компонент. Модификацией этого способа является схема с двойным прохождением света через АО фильтр после отражения от зеркала. Другие методы подавления указанных эффектов рассмотрены в работе [3].

Нами экспериментально исследовались два последовательно расположенных фильтра, подключенные к одному генератору, которые работали в режиме фильтрации Фурье-образа изображения. Во всем рабочем диапазоне спектра фильтров разрешение по обеим координатам оказалось близким к дифракционному, что соответствует не менее  $10^3$  элементам разложения по каждой координате.

Следует отметить, что для компенсации дисперсии угла отклонения идентичность последовательно включенных фильтров необязательна, а достаточно совпадение множителя  $\beta$  в приведенных выше формулах. Это свойство дает возможность уменьшить максимальный уровень боковых максимумов частотно-волновой характеристики данной схемы фильтрации за счет выбора разной длины взаимодействия в ячейках. Моделирование на ЭВМ показало возможность подавления уровня боковых максимумов в 4 раза по сравнению со случаем использования двух одинаковых фильтров. Максимальная относительная величина боковых максимумов не превышает  $3 \cdot 10^{-3}$  при оптимальном соотношении длин взаимодействия в ячейках, равном 1.5. При этом наблюдается улучшение как частотно-волновой, так и угловой характеристик.

Из других преимуществ схемы двойной фильтрации необходимо отметить возможность достижения высокого отношения сигнал/фон. Эксперименты показывают, что для белого света достижимо отношение более  $10^3$ , что очень важно в задачах фильтрации изображений, поскольку такой распространенный прием улучшения характеристик системы регистрации, как измерение и вычитание фонового потока из информационного, затруднителен в случае

обработки изображений ввиду большого объема необходимой памяти и возможного сдвига изображения за время измерения фона.

В заключение авторы благодарят Л. Л. Пальцева и А. А. Казакову за изготовление фильтров и В. М. Епихина за полезное обсуждение.

### Список литературы

- [1] Chang I. C. // Opt. Engin. 1977. Vol. 16. N 5. P. 455—460.
- [2] Беликов И. Б., Буймистрюк Г. Я., Волошинов В. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 20. С. 1225—1229.
- [3] Епихин В. М., Калинин Ю. К. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 2. С. 160—163.

Всесоюзный научно-исследовательский  
институт физико-технических  
и радиотехнических измерений  
Московская обл.

Поступило в Редакцию  
2 декабря 1987 г.

06; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 9, 1989

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ, СНИЖАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

*Н. М. Масленников, Ю. И. Сидоров, Т. П. Фролова,  
Л. В. Турикова*

О причинах снижения напряжения пробоя опубликовано большое количество статей и книг (см., например, [1<sup>—3</sup>]). В одной из последних работ [4] снижение напряжения пробоя объясняется микротрещинами, возникающими на периферии пластин после механической обработки кристаллов кремния. Согласно данным другой работы [5], снижение напряжения пробоя вызвано неконтролируемыми примесями, локально уменьшающими удельное сопротивление  $\rho$  пластины кремния, причем дефекты структуры напряжение пробоя не снижают, поскольку в большинстве случаев в местах пробоя они не обнаруживались. Таким образом, результаты даже последних работ оказываются противоречивыми.

В настоящей работе исследовалось влияние термообработки (ТО) на образование дефектов в пластинах кремния и влияние этих дефектов на напряжение пробоя  $p$ — $n$ —структур. Применялся кремний, выращенный методом бестигельной зонной плавки (БЗП), и радиационно-легированный кремний (РЛК) с  $\rho=100$ — $300$  Ом·см. Дефекты выявлялись с помощью инфракрасного (ИК) микроскопа, который состоял из источника излучения, столика с пластиной кремния, увеличительной системы и телевизионной установки типа ПТУ-50 с ИК-видикомом.

Недекорированные дефекты наблюдать не удавалось, поэтому проводилось декорирование медью, что давало возможность исследовать развитие дефектов в процессе ТО. Диаметр пластин кремния равнялся 36, 52, 58 и 82 мм, толщина 600—1200 мкм. Всего было обследовано около 200 пластин кремния как отечественных, так и зарубежных марок. При этом было установлено следующее.

До ТО в декорированных пластинах наблюдается какая-либо из разновидностей дефектов: круглые с нечеткими границами, в виде стержней или звезд с характерным размером 10—20 мкм. После ТО (диффузия алюминия и бора при 1250 °С в течение 30 ч) в декорированных пластинах диаметром 36, 52 и 58 мм наблюдаются крупномасштабные петлевидные дефекты протяженностью 200—1000 мкм, которые можно идентифицировать как дислокационные образования (рис. 1). Эти дефекты располагаются в основном на периферии пластины в пределах кольца шириной примерно 10 мм, их максимальная плотность достигает 200 см<sup>-2</sup>. Основное количество дефектов расположено на одинаковой глубине вблизи середины пластины. Однако отдельные дефекты лежат под углом к плоскости пластины, пронизывая большую часть ее толщины.

При увеличении диаметра пластин плотность дефектов возрастает. Так, на пластинах диаметром 82 мм наиболее типичными являются протяженные дефекты неопределенной формы