

УДК 535.4:621.317

РАСШИРЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПРЕДЕЛОВ КРИВИЗНЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ 3D-ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЗАПИСИ МИКРОРЕЛЬЕФА

© В. П. Кирьянов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kiryanov@iae.nsk.su*

Анализируется функционирование системы автоматической фокусировки излучения технологических лазеров на оптические 3D-поверхности, реализованной в оптической головке записи лазерного генератора изображений модели ЛГИ-2. Обсуждаются причины серьёзных ограничений по допустимому наклону поверхности записи. Предлагается альтернативное решение, позволяющее существенно увеличить допустимый угол наклона осесимметричных поверхностей, на которых должна проводиться запись топологии микроструктур.

Ключевые слова: автоматическая фокусировка, оптические 3D-поверхности, нож Фуко, датчик расфокусировки.

DOI: 10.15372/AUT20220203

Введение. Разработка технологии синтеза элементов гибридной (рефракционно-дифракционной) оптики требует наличия соответствующей аппаратуры, позволяющей осуществлять запись дифракционных структур на классических оптических 3D-поверхностях. Наиболее удобно удаётся обрабатывать важнейшие элементы данной технологии с помощью лазерных генераторов изображений (ЛГИ) с круговым сканированием, позволяющим осуществлять запись дифракционных структур непосредственно на осесимметричных 3D-поверхностях [1–5]. В настоящее время наиболее подходящими объектами для таких экспериментов являются объективы тепловизионных систем, в которых широко используется германиевая оптика. Беглый анализ объективов для подобных применений показывает, что оптические поверхности линз объективов имеют на краях рабочей апертуры кривизну поверхности, достигающую 24–30°, в то время как созданные к настоящему времени ЛГИ, например модели ЛГИ-2, обеспечивают запись структур в диапазоне лишь 0–8°. Следовательно, в этих экспериментах почти 90 % оптической поверхности линзы не будет подвержено аподизации. Столь жёсткое ограничение области записи связано, по мнению автора, с выбором технического решения системы автоматической фокусировки (САФ) излучения технологических лазеров на оптические 3D-поверхности, реализованной в оптической головке записи генератора изображений модели ЛГИ-2.

Цель данного сообщения — показать целесообразность использования альтернативного варианта построения САФ излучения технологических лазеров на оптические 3D-поверхности, основанного на использовании классической схемы теневого метода Фуко [6].

Результаты анализа функционирования астигматической САФ на основе ножа Фуко при наклонах поверхности записи. Достаточно подробный анализ особенностей функционирования САФ астигматического типа, реализованной в ЛГИ-2, приведён в [3–5]. В данном сообщении рассматриваются только выводы, непосредственно касающиеся проблемы ограничений в работе созданной в ЛГИ-2 САФ, обусловленных наличием наклона поверхности записи. В [3] отмечается, что в генераторах изображений модели

ЛГИ-2 реализован вариант САФ на основе ножа Фуко, получивший название астигматического (асимметричного). И этот признак, по мнению автора, является решающим для проявления достаточно жёстких ограничений на допустимый наклон оптических поверхностей при записи на них дифракционных структур.

В анализируемой системе при нахождении микрообъектива записи в положении наилучшей фокусировки отражённое от поверхности записи зондирующее излучение после выхода из микрообъектива автоматически формируется в параллельный пучок света. Это излучение подводится строго концентрично к линзе датчика расфокусировки САФ. Нож Фуко, размещённый непосредственно перед линзой, юстируется таким образом, чтобы можно было обрезать падающее на линзу зондирующее излучение точно по диаметру его поперечного сечения. Из оставшейся половины пучка линза формирует сходящийся пучок света. На пути сходящегося пучка устанавливается сдвоенный диод таким образом, чтобы выходные сигналы обоих фотодиодов (U_1 и U_2) были равны между собой. Эти сигналы в регуляторе САФ оцифровываются и преобразуются в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}. \quad (1)$$

В этом случае при замыкании петли обратной связи в САФ последняя будет удерживать положение наилучшей фокусировки микрообъектива на поверхность записи. Чтобы выполнять операцию автофокусировки надёжно, необходимо иметь высокое отношение сигнала к шуму при формировании $U_{\text{вых}}$. Для этого надо формировать оба сигнала U_1 и U_2 достаточной амплитуды, что реализуется, если размеры пятна засветки на порядок больше, чем размеры промежутка между фотодиодами. Учитывая неравномерный (гауссовый) характер распределения плотности мощности в поперечном сечении зондирующего излучения и криволинейность границ поперечного сечения оставшегося излучения после ножа Фуко, можно утверждать, что для достижения требования $U_{\text{вых}} = 0$ необходимо установить границу раздела двух фотодиодов существенно несимметрично относительно оптической оси излучения. В случаях фокусировки микрообъектива на плоскую поверхность записи подобная асимметрия не играет отрицательной роли.

Система автофокусировки обрабатывает положение наилучшей фокусировки с наименьшей неопределённостью, если область «перетяжки» микрообъектива записи имеет минимальные размеры. Это достигается в случае, если зондирующее излучение от датчика расфокусировки САФ заполняет входную апертуру микрообъектива записи так же целиком, как это делается для излучения технологического лазера.

Ситуация заметно ухудшится, когда в положении наилучшей фокусировки микрообъектива записи оптическая поверхность наклонена, что происходит при смещении микрообъектива из центра $3D$ -поверхности на периферию. В этом случае пятно засветки $3D$ -поверхности из круга превращается в эллипс, большая ось которого ориентирована согласно наибольшего градиента поверхности. Оптическая ось зондирующего излучения, отражённого от наклонной поверхности, оказывается также наклонённой, причём на удвоенный угол текущего наклона поверхности. Так как в исходном состоянии зондирующее излучение заполняло входную апертуру микрообъектива целиком, то вследствие наклона оси возвращающегося пучка света его поперечное сечение оказывается искажённым с одной стороны из-за затенения корпусными деталями микрообъектива. Подобные искажения пространственного положения оси пучка и формы поперечного сечения отражённого излучения сказываются на точности работы всей САФ. Анализ процедуры формирования сигнала управления в САФ, когда микрообъектив записи находится в плоскости наилучшей фокусировки, но имеет место наклон отражающей поверхности, показывает, что происходит смещение оптической оси возвращающегося пучка света, которое приводит к

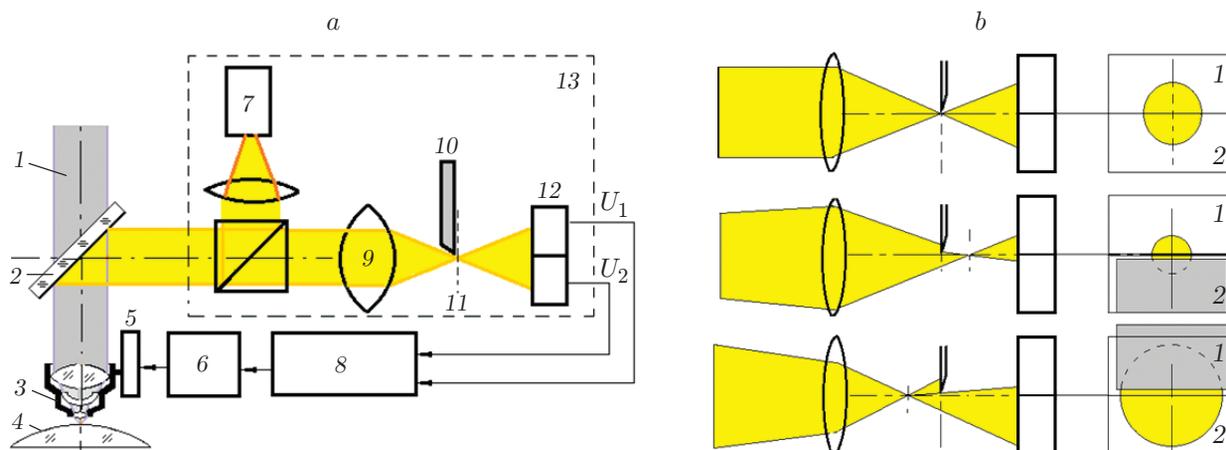


Рис. 1. Система автофокусировки на основе ножа Фуко классического типа: *a* — функциональная схема САФ; *b* — форма поперечного сечения пятна подсветки фотодиодов 1 и 2 при точной фокусировке (верхняя схема), при перефокусировке (средняя) и недофокусировке (нижняя)

паразитному изменению условий освещённости обоих фотодиодов. Искажение формы поперечного сечения отражённого излучения также приводит к изменению освещённости фотодиодов. Обе причины вызывают изменение текущего значения $U_{\text{ВЫХ}}$, которое для выбранных условий анализа смещалось в положительную сторону и вызывало паразитное смещение микрообъектива в сторону увеличения зазора между ним и $3D$ -поверхностью. Это приводило, естественно, к расфокусировке излучения технологического лазера. По мере увеличения наклона поверхности асимметрия приводит к дальнейшему паразитному увеличению зазора и к увеличению расфокусировки излучения технологического лазера. При некотором значении угла наклона поверхности подводимой мощности от технологического лазера становится недостаточно для полноценной экспозиции фоточувствительного слоя и запись структур становится невозможной.

Возможности альтернативного варианта системы автофокусировки с ножом Фуко. Альтернативный вариант САФ на основе ножа Фуко основан на применении классической схемы теневого метода Фуко [6], когда нож Фуко 10 устанавливается в фокальной плоскости тубусной линзы 9 датчика расфокусировки 13 (рис. 1, *a*). Данную систему целесообразно использовать для автоматической фокусировки излучения технологического лазера 1 с помощью микрообъектива 3 на криволинейную поверхность 4, покрытую фоточувствительным слоем. Для этого можно использовать типовую систему автоматической фокусировки, состоящую из датчика расфокусировки 13, регулятора 8, силового драйвера 6 и линейного двигателя 5, жёстко соединённого с микрообъективом 3. В состав датчика расфокусировки 13 входят: источник зондирующего излучения 7, линза 9, нож Фуко 10 и двоянный фотодиод 12. Рассмотрим функционирование подобной версии САФ для случая записи структур на плоской поверхности. Пусть петля обратной связи САФ разомкнута и микрообъектив 3 выведен в положение наилучшей фокусировки с помощью методов классической оптики. В этой ситуации отражённый свет зондирующего излучения на выходе из микрообъектива формируется в параллельный пучок, который после отражения в дихроичном зеркале 2 достигает линзы 9. Линза в своей фокальной плоскости 11 собирает падающее на неё излучение в пятно малого диаметра. Нож Фуко подводится к ближайшим окрестностям «перетяжки» линзы на расстояние порядка радиуса «перетяжки». Двоянный фотодиод устанавливается в плоскости, в которой размер промежутка между диодами (порядка 30 мкм) становится существенно меньшим, чем диа-

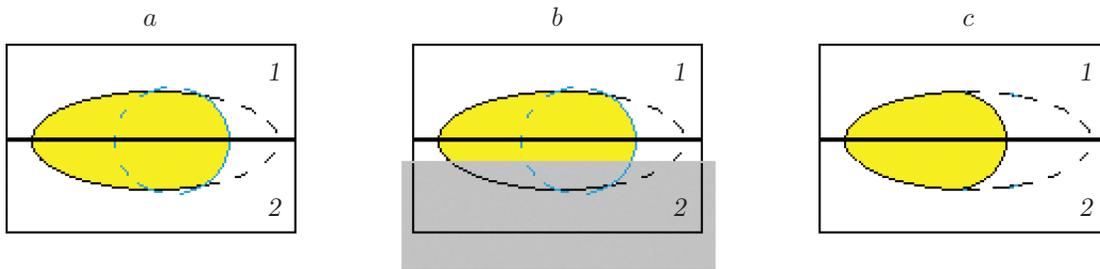


Рис. 2. Форма поперечного сечения пятна подсветки фотодиодов при наклоне поверхности записи: *a* — при малых наклонах вблизи плоскости наилучшей фокусировки; *b* — при малых наклонах вдали от плоскости наилучшей фокусировки; *c* — при увеличенных наклонах вблизи плоскости наилучшей фокусировки

метр пятна засветки (чтобы излишне не терять свет и не ухудшать отношение сигнал/шум в выражении (1)). Значение $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ достигается при установке границы раздела между фотодиодами точно по диаметру пятна засветки, т. е. симметрично относительно оптической оси (рис. 1, *b*, верхняя схема). Если зазор между микрообъективом 3 и поверхностью записи 4 становится бóльшим, чем фокусное расстояние микрообъектива, то зондирующее излучение на его выходе после отражения становится сходящимся (см. рис. 1, *b*, нижняя схема). Как следствие, линза соберёт его в «точку» перед собственной фокальной плоскостью 11. В этой ситуации нож Фуко затеняет часть зондирующего излучения, падающего на периферию первого фотодиода. В результате текущие значения $U_{\text{ВЫХ}}$ уходят в отрицательную область и вызывают смещение микрообъектива 3 в сторону уменьшения зазора и восстановления положения его наилучшей фокусировки. Если же вдруг зазор станет меньшим по сравнению с фокусным расстоянием микрообъектива 3, то зондирующее излучение после отражения от поверхности 4 и выхода из микрообъектива будет представлять собой расходящийся пучок света, который линзой будет фокусироваться за собственной фокальной плоскостью (см. рис. 1, *b*, средняя схема). В этом случае нож Фуко начнёт затенять часть зондирующего излучения, падающего на периферию второго фотодиода. Тогда текущие значения $U_{\text{ВЫХ}}$ уходят в положительную область и вызывают смещение микрообъектива в сторону увеличения зазора и восстановления положения его наилучшей фокусировки.

Таким образом, при работе с плоскими поверхностями не наблюдается отличий в функционировании обоих вариантов САФ на базе ножа Фуко.

Рассмотрим особенности альтернативного варианта САФ при записи структур на наклонные поверхности. Разомкнём обратную связь и выставим микрообъектив 3 в положение наилучшей фокусировки в позиции, когда поверхность записи будет иметь наклон. В этой ситуации отражённое от поверхности 4 зондирующее излучение сформируется в практически параллельный пучок света, но его поперечное сечение будет отличаться от исходного кругового. Оно будет представлять собой эллипс, к тому же искажённый с одной стороны корпусными деталями микрообъектива. Но поперечное сечение сохраняет свою исходную симметричность относительно большой оси. Линза 9 проектирует подобное пятно на рабочую поверхность сдвоенного фотодиода 11 (рис. 2, *a*). В этой ситуации нож Фуко практически не взаимодействует с зондирующим излучением. Поэтому при ориентации границы раздела фотодиодов 1 и 2 (рис. 2) строго вдоль большой оси пятна легко достигается равенство нулю выходного сигнала (1). Как следствие, замыкание обратной связи в САФ не вызовет паразитных смещений микрообъектива. Спонтанное изменение, например увеличение зазора, приведёт к частичному затенению пятна, в данном случае на периферии второго фотодиода (рис. 2, *b*). Дальнейшее увеличение наклона поверхности 4

приведёт к ещё большему искажению формы поперечного сечения (рис. 2, *c*), но при сохранении его симметрии относительно большой оси. Это увеличенное искажение формы поперечного сечения приведёт к пропорциональному уменьшению амплитуды обоих выходных сигналов (U_1 и U_2). Но последующая обработка сигналов в соответствии с (1) восстановит параметры сигнала управления $U_{\text{ВЫХ}}$ и, как следствие, сохранит значение $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ и положение наилучшей фокусировки. Изменится только соотношение сигнал/шум в сигнале $U_{\text{ВЫХ}}$. Характерно, что при некотором достаточно большом наклоне поверхности произойдёт затенение половины поперечного сечения (характерного для исходного состояния в астигматическом варианте САФ с ножом Фуко). В данном случае это не вызовет какого-либо ухудшения функционирования альтернативного варианта САФ. Дальнейшее увеличение наклона поверхности вызовет ещё большее уменьшение остаточного пятна света, попадающего на фотодиоды. Нормировка результата сравнения потоков света, падающих на оба фотодиода, на текущую интенсивность засветки фотодиодов, выполняемая в соответствии с (1), позволяет и в этом случае сохранять неизменными соотношения между текущими значениями сигнала управления и положением микрообъектива, но уже при возросшем уровне сопутствующих электронных шумов. Именно возросший уровень шумов в сигнале управления ограничит допустимое значение наклона отражающей поверхности, так как вызовет неустойчивость в работе регулятора δ .

Заключение. Таким образом, показано, что именно астигматический принцип реализации теневого метода Фуко ответственен за наличие жёстких ограничений на допустимый наклон поверхности, на которую производится фокусировка излучения технологического лазера при записи топологии дифракционных структур. Рассмотренный в работе альтернативный (симметричный) вариант САФ, сформированной на основе теневого метода Фуко, позволяет обеспечить устойчивое функционирование системы при существенно увеличенном по сравнению с САФ астигматического типа наклоне оптической 3D-поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. 2262749 РФ.** Способ автоматической фокусировки для записи информации на криволинейных поверхностях /В. М. Ведерников, А. Г. Верхогляд, Л. Б. Касторский и др. Опубл. 20.10.2005; Бюл. № 29.
2. **Ведерников В. М., Верхогляд А. Г., Гуренко В. М. и др.** Лазерный генератор изображений для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на трёхмерных осесимметричных поверхностях // Автометрия. 2004. 40, № 2. С. 46–58.
3. **Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Каличкин А. Е. и др.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях // Датчики и системы. 2015. № 9/10. С. 45–52.
4. **Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Корольков В. П.** Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем // Сб. матер. Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2014». Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 117–122.
5. **Завьялова М. А.** Разработка и исследование оптических высокоразрешающих датчиков контроля положения рабочих поверхностей для оперативного управления технологическими процессами: Дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ФГБУН КТИ НП СО РАН, 2020. 132 с.
6. **Максутов Д. Д.** Изготовление и исследование астрономической оптики. Л.-М.: ОГИЗ, 1948.

Поступила в редакцию 20.01.2022

После доработки 14.02.2022

Принята к публикации 14.02.2022