

## ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Б.Ю. Новиков, М.К. Шадчин**

Локальная модификация фазового состояния стеклокерамических материалов является перспективным методом формирования микроэлементов. Описаны принципы лазерно-индуцированной фазо-структурной модификации двух типов стеклокерамических материалов – фоточувствительных стекол и ситаллов. Описано применение в данной технологии лазерного излучения различных длин волн. Показана возможность изготовления различных типов микроэлементов с широким диапазоном параметров.

**Ключевые слова:** микроэлементы, микроустройства, стеклокерамика, фоточувствительное стекло, ситалл, лазерная модификация.

### Введение

Потребность в миниатюризации и усложнении технических устройств обусловила существование множества методов производства микроэлементов. Некоторые методы основаны на деформации или удалении материала вблизи поверхности. Но более широко разрабатываются направления локальной смены фазового состояния, что приводит к локальным изменениям физико-химических свойств материалов.

Способы формирования структурной перестройки без применения лазерных технологий предусматривают выбор легко модифицируемого материала и использование специфических инструментов воздействия. Чаще всего такие способы многоступенчатые и предусматривают многочасовую обработку материала. Использование лазерного излучения имеет ряд преимуществ перед другими методами локальной модификации, а именно – локальность и бесконтактность воздействия, высокоэнергетический характер излучения, возможность задания энергетических и геометрических параметров воздействия. Применение лазерного излучения позволяет расширить диапазон модифицируемых материалов, значительно сократить время формирования фазо-структурной модификации и избежать промежуточных этапов обработки.

Наибольший интерес представляет фазо-структурная модификация стеклокерамических материалов. Эти материалы имеют два фазовых состояния, радикально различных по оптической прозрачности, удельному объему, механическим свойствам, химической активности и другим свойствам. Аморфная фаза стеклокерамических материалов обладает свойствами, характерными для стекол, она обычно прозрачна и имеет большой фазовый объем. При специальной обработке в стеклокерамических материалах формируется большое количество микрокристаллов, из-за которых поликристаллическая фаза этих материалов непрозрачна и обладает высокой механической устойчивостью. Особенности технологии лазерно-индуцированной фазо-структурной модификации стеклокерамических материалов, открывающими широкие возможности ее применения для формирования микроэлементов, являются:

- возможность управляемой смены поликристаллической и аморфной фаз материала, которые обладают существенными различиями в свойствах;
- локальность модификации материала;
- короткое (1–100 с) время протекания модификации.

Параметрами формируемых элементов можно управлять благодаря возможности задания характеристик лазерного излучения. Например, размерами элементов можно управлять через плотность мощности лазера, время воздействия и температуру предварительного подогрева; формой элементов – путем сканирования лазерного пучка или с помощью проекционных масок; оптическими свойствами (пропусканием, дисперсией) через выбор состава исходного материала [1].

Существует два типа стеклокерамических материалов – фоточувствительные стекла и ситаллы.

### Модификация фоточувствительных стекол

Фоточувствительные стекла непосредственно предназначены для локальной фазово-структурной модификации, основным их качеством является способность к контролируемому формированию в исходном аморфном объеме кристаллизованных участков при проведении специальной поэтапной обработки: сначала определенные участки материала сенсбилизируются УФ излучением, затем проводится отжиг в печи для развития кристаллической фазы, которая формируется только в местах УФ облучения [2]. Подобная обработка может быть проведена при замене излучения УФ ламп лазерным УФ излучением, которое, вместе с тем, обладает дополнительными достоинствами, например, позволяет уменьшить энергетические затраты и снизить время облучения. Применение лазерного УФ излучения наносекундной длительности дает возможность не использовать маску и, кроме того, позволяет облучать материал на длинах волн, которые находятся вне полосы поглощения фотоактиватора. Глубина записи скрытого изображения в фоточувствительном стекле при воздействии УФ излучения зависит от длины волны излучения и от плотности энергии потока [3].

Новые возможности формирования кристаллизованных областей фоточувствительного стекла можно получить при использовании излучения фемтосекундных лазеров (775 нм). В этом случае за счет процесса мультифотонного поглощения запись скрытого изображения может происходить внутри объема исходного материала, который прозрачен для рабочего излучения [4].

Расширить диапазон формируемых элементов позволяет дальнейшее травление исходной аморфной (для отечественного фоточувствительного стекла ФС-1) или лазерно-индуцированной поликристаллической фазы (для зарубежных фоточувствительных стекол Foturan, Fotoform) в кислотах, чаще всего в 10%-м или 5%-м растворе фтористоводородной (плавиковой) кислоты [2]. Дополнительным способом увеличения рельефа служит ионно-молекулярный обмен, который возможен только для аморфной фазы фоточувствительного стекла, кристаллическая фаза может при этом играть роль маски [5].

Двухэтапная локальная модификация фоточувствительных стекол является отлаженной промышленной технологией. Данная технология успешно применяется для производства разнообразных элементов и устройств, например, периодических микроструктур, механических микроэлементов, элементов гидродинамических и химических микроустройств, сенсоров аналитических микросистем и т.п. Этот метод также может быть применен для записи голограмм и дифракционных решеток.

Воздействие излучения непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера (10,6 мкм) позволяет проводить кристаллизацию фоточувствительных стекол за один этап [5, 6] (рис. 1), что неочевидно, так как традиционный метод обработки подразумевает несколько стадий инициирования кристаллизации. Кроме того, воздействие излучения CO<sub>2</sub>-лазера позволяет осуществлять аморфизацию закристаллизованных фоточувствительных стекол, что также неочевидно. Для формирования вторичной аморфной фазы фоточувствительных стекол необходимо не только разрушение границ микрокристаллов, но и инициирование фотохимических реакций, обратных реакциям при формировании кристаллизации.

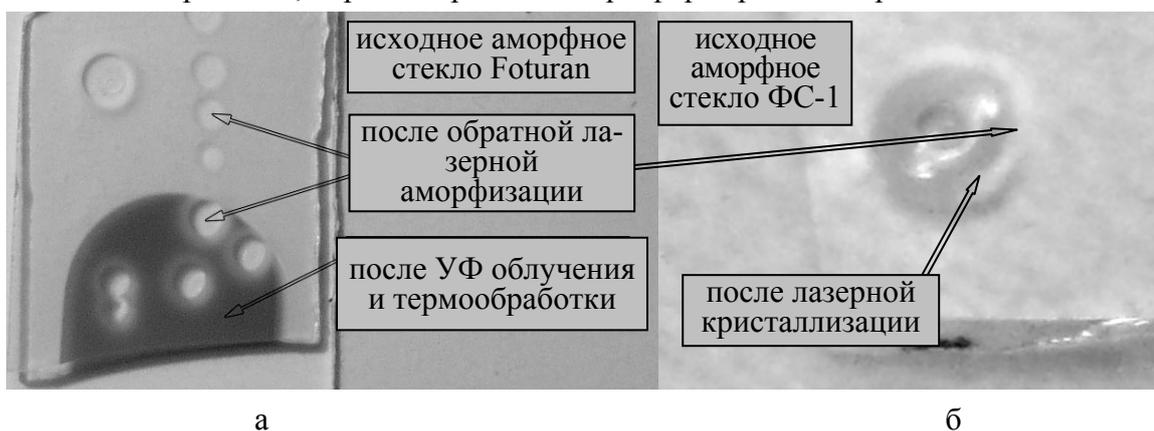


Рис. 1. а – обратная аморфизация фоточувствительного стекла Foturan под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера; б – кристаллизация и обратная аморфизация фоточувствительного стекла ФС-1 под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера

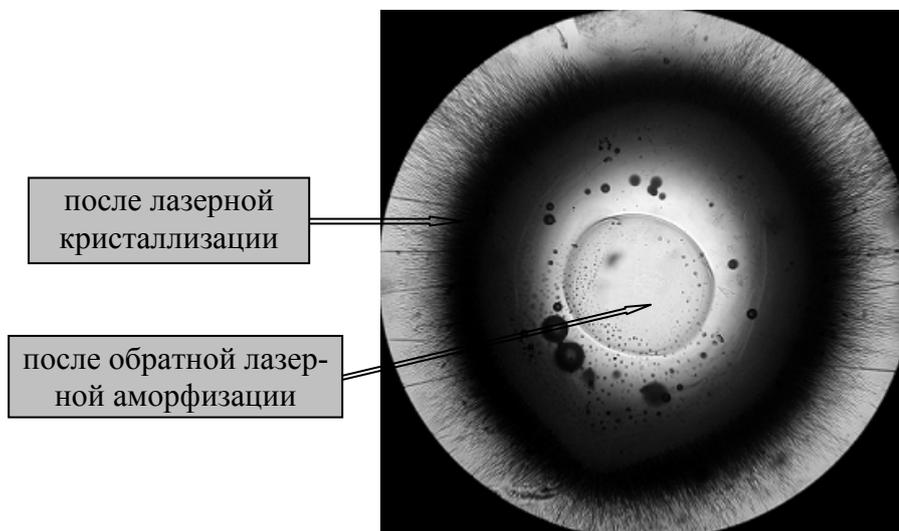


Рис. 2. Область фазово-структурной модификации фоточувствительного стекла ФС-1, полученная под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Фотография через микроскоп в проходящем свете

Длина волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера лежит в области фундаментального поглощения всех материалов на основе SiO<sub>2</sub> (за счет колебательно-вращательных переходов), данное излучение эффективно поглощается как в аморфной, так и в кристаллической фазах стеклокерамических материалов. В этом случае источник нагрева – поверхностный, распространение тепла в материале происходит по закону теплопроводности. Радиальное продвижение температурного фронта в материале накладывает ограничения на геометрические параметры модифицированных областей, т.е. формируемых микроэлементов. Кроме того, образуются зоны с различной температурой, в которых формируются различные кристаллические структуры (рис. 2), так как фоточувствительные стекла обладают несколькими кристаллическими фазами. Отсутствие в этом случае четкой границы между кристаллической и аморфной областями и развитие отдельных кристаллов в аморфной области также неблагоприятно для формирования микроэлементов.

### Модификация ситаллов

Локальная фазово-структурная модификация ситаллов возможна только при использовании лазерного излучения. Данный метод основан на локальном плавлении участка материала и возможности многократного формирования из расплава в одном и том же исходном объеме аморфной или поликристаллической фаз при задании определенных условий обработки. Лазерно-индуцированная ванна расплава занимает весьма малый участок по сравнению с объемом всей заготовки, после окончания облучения за счет эффективного теплоотвода в окружающие участки она охлаждается до температуры стеклования настолько быстро, что атомы не успевают перегруппироваться в упорядоченную структуру. А при замедленном охлаждении расплава формируются кристаллические структуры.

Одним из наиболее интересных применений данной технологии является изготовление двояковыпуклых микролинз методом лазерно-индуцированной сквозной аморфизации пластин ситалла СТ-50-1 [1, 5, 7] (рис. 3), возможное лишь с использованием данного метода. Локальное воздействие лазерного излучения приводит к формированию прозрачного аморфного окна в исходном непрозрачном поликристаллическом материале. Объем вещества в аморфной фазе больше, чем в кристаллической, поэтому расплав растекается по поверхностям пластины, и благодаря силе поверхностного натяжения модифицированная область приобретает линзообразную форму. Размеры микролинз могут варьироваться от сотен микрометров до нескольких миллиметров. Микролинзы показывают высокое оптическое качество и воспроизводимость более 90% (рис. 4). Отмечается, что возможно получать линзы с различной конфигурацией зрачка эллиптические, квадратные и т.п., используя соответствующие маски.



Рис. 3. Схематическое изображение двояковыпуклой микролинзы, сформированной на тонкой пластине ситалла СТ-50-1 методом лазерно-индуцированной аморфизации

Фокусное расстояние формируемых микролинз лежит в широких пределах (от единиц мм до 30 мм), апертура составляет величину порядка 0,05–0,06. Для увеличения апертуры микролинз было предложено использовать дополнительную навеску (из того же или из другого материала), добавленную в зону облучения. В процессе воздействия лазерного излучения навеска расплавляется и перемещивается с материалом образца, образуется общая ванна расплава, при остывании которой формируются линзы с большими радиусами кривизны поверхности, т.е. с большей апертурой. При применении этой техники числовая апертура линз увеличивается до 0,1–0,6 и даже больше [1, 5, 7].

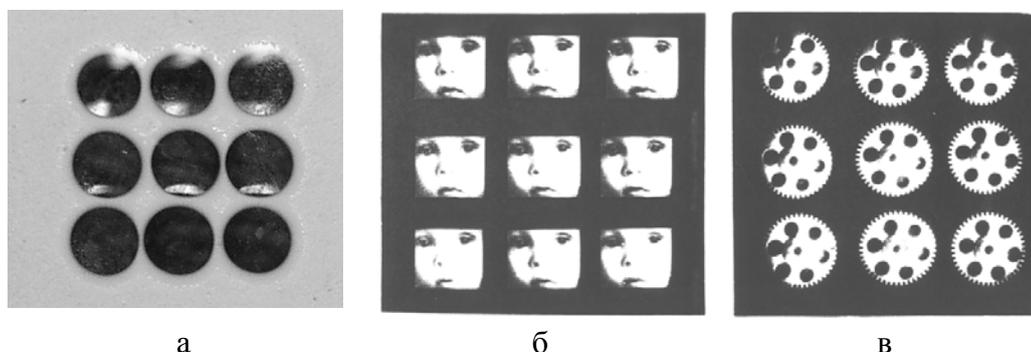


Рис. 4. Растр двояковыпуклых микролинз, полученный в пластине ситалла СТ-50-1 методом локальной лазерной аморфизации (а), и изображения объектов, снятых с его помощью (б, в). Фокусное расстояние микролинз около 21 мм [1]

При лазерно-индуцированной аморфизации поверхности ситалла СТ-50-1 с использованием навески или при сочетании этих методов возможно формирование геодезических (планарных) микролинз [1, 7, 8]. Такие линзы используются для фокусировки света в поверхности, перпендикулярной к их оптической оси. В качестве геодезической микролинзы может быть использована двояковыпуклая микролинза, тогда излучение следует вводить с боковой стороны выпуклости. В [8] предложено использовать метод навески для формирования оптических микросфер размером от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Заготовка ситалла размягчается (т.е. аморфизируется) в свободном пространстве, сферическая форма элемента формируется за счет сил поверхностного натяжения.

Воздействие лазерного излучения на вращающуюся заготовку ситалла позволяет получить аморфизированные области с геометрическими профилями поверхностей, соответствующими рассеивающим линзам, линзам, обладающим кольцевым фокусом, с асферическими выпуклостями (например, параболическими). Большой интерес представляет также получение микроэлементов с асферическими поверхностями (эллипсоидальными, тороидальными, цилиндрическими и др.) при воздействии лазерного излучения со специально сформированным распределением плотности мощности по световому пятну, например, с помощью сканатора [7]. Сканирование лазерного луча по поверхности ситалла позволяет формировать протяженные аморфизированные области произвольной формы. Такие области могут быть использованы как просветленные каналы и цилиндрические линзы, которые являются оптимальными оптическими элементами для фокусировки излучения полупроводникового лазера в точку [1, 5, 7].

Были проведены исследования по фазово-структурной модификации ситаллов под действием излучения непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера (10,6 мкм) [1, 5, 7] и излучения непрерывного YAG:Nd-лазера (1,06 мкм) [9]. При воздействии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера изотерма плавления движется в ситалле за счет теплопроводности, что накладывает ограничения на параметры модифицированных областей.

Воздействие излучения YAG:Nd-лазера на ситалл СТ-50-1 имеет принципиальное отличие от случая применения излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. В [7] отмечается, что ослабление излучения YAG:Nd-лазера в ситалле СТ-50-1 обусловлено в основном рассеянием света на микрокристаллах, размеры которых (1–2 мкм) соизмеримы с величиной длины волны данного излучения. При лазерном воздействии сообщение материалу энергии, необходимой для нагрева до температуры плавления, происходит за счет многократного отражения излучения от границ микрокристаллов. Сформированная аморфная фаза начинает свободно пропускать излучение. В результате при облучении ситалла СТ-50-1 излучением YAG:Nd-лазера расплавление будет происходить сначала в слое, толщина которого складывается из глубины проникновения излучения и слоя, прогретого до температуры плавления, а последующие слои будут формироваться сквозь этот аморфизированный участок, поглощение рабочего излучения в котором пренебрежимо мало. В данном случае происходит процесс динамического просветления ситалла в глубину, имеется возможность формировать аморфизированные области, глубина которых значительно больше их радиуса, что невозможно было получить при использовании излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. Однако из-за того, что аморфная фаза ситалла пропускает излучение YAG:Nd-лазера, температура просветленной области может начать снижаться. В этом случае из-за некоторого остывания ванны расплава в ней могут формироваться отдельные кристаллы, происходит разделение на фазы (ликвация), возникает градиент показателя преломления и формироваться обратная кристаллизация по краям области воздействия. Эти эффекты, несомненно, ухудшают качество формируемых оптических элементов.

Локальное формирование обратной кристаллизации ситалла СТ-50-1 возможно только под действием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, которое поглощается в поверхностном слое обоих фаз ситалла. Формирование обратной кристаллизации ситалла под действием излучения YAG:Nd-лазера возможно по следующему методу: прозрачная для рабочего излучения аморфная область нагревается за счет теплопроводностной передачи тепла из окружающих поликристаллических участков благодаря тому, что размер области воздействия намного больше размера области предполагаемой кристаллизации.

Последовательное формирование аморфизации и кристаллизации ситалла на разных глубинах позволяет изготовить «мостковые» (трехслойные) схемы, которые могут быть использованы для разработки систем записи информации. Последовательно комбинируя при разных размерах пучка аморфизацию и частичную кристаллизацию одной и той же зоны ситалла, можно создавать различные интегральные диафрагмы (включая аподизированные) и дифракционные оптические элементы. Процессы лазерной аморфизации и кристаллизации тонких стеклокерамических пленок находят применение при оптической записи и хранении информации [5].

## Заключение

Использование лазерного излучения различных длин волн позволяет расширить возможности модификации фоточувствительных стекол (например, внутриобъемная запись скрытого изображения под действием излучения фемтосекундного лазера, обратная аморфизация под действием излучения СО<sub>2</sub>-лазера) и упростить этапы ее формирования (протекание модификации за один этап под действием излучения СО<sub>2</sub>-лазера). Локальная фазово-структурная модификация ситаллов возможна только при использовании лазерного излучения, данная технология перспективна для формирования оптических элементов.

Лазерно-индуцированная фазово-структурная модификация стеклокерамических материалов позволяет изготавливать множество различных типов микроэлементов с широким диапазоном параметров. Параметрами формируемых элементов можно управлять благодаря возможности задания характеристик лазерного излучения. При воздействии лазерного излучения на разные участки материала возможно формирование оптических микросистем с различными наборами и компоновкой элементов.

## Литература

1. Вейко В.П., Киеу К.К. Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 1. – С. 92–98.
2. Caltech Engineering Design Research Laboratory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://design.caltech.edu/micropropulsion/foturane.html> (на 31.01.2008), своб.
3. Fuqua P., Janson S.W., Hansen W.W., Helvajian H. Fabrication of true 3D microstructures in glass-ceramic materials by pulsed UV laser volumetric exposure techniques // Proceedings of SPIE. – 1999. – V. 3618. – P. 213–220.
4. Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. Microfabrication of 3D hollow structures embedded in glass by femtosecond laser for Lab-on-a-chip applications // Applied Surface Science. – 2005. – V. 248. – P. 172–176.
5. Veiko V.P., Kieu Q.K., Nikonov N.V. Laser modification of glass-ceramics structure and properties: a new view to traditional materials // Proceedings of SPIE. – 2004. – V. 5662. – P. 119–128.
6. Вейко В.П., Костюк Г.К., Никоноров Н.В., Рачинская А.Н. Лазерная модификация структуры фоточувствительной стеклокерамики // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 9. – С. 5–9.
7. Скиба П.А. Лазерная модификация стекловидных материалов. – Минск: БГУ, 1999. – 131 с.
8. Вейко В.П., Киеу К., Rho S. Лазерное изготовление оптических микролинз и микро сфер // Известия вузов. – Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 10. – С. 30–35.
9. Вейко В.П., Шахно Е.А., Яковлев Е.Б., Новиков Б.Ю. Нелинейное просветление ситалла излучением YAG:Nd-лазера // Известия вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 14–19.

**Новиков Борис Юрьевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, novikov-bu@yandex.ru

**Шадчин Максим Константинович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Maximshadchin@gmail.com