

Широкоапертурные биморфные зеркала и проблема „пропечатывания“ структуры разделенных пьезопластин

© В.В. Самаркин, А.Г. Александров, П.М. Кузьмицкий, А.В. Кудряшов

Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

E-mail: kud@activeoptics.ru

Поступило в Редакцию 23 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 7 октября 2025 г.

Принято к публикации 7 октября 2025 г.

Представлены результаты исследования возникновения и компенсации эффекта „пропечатывания“ пьезо-керамических пластин в широкоапертурных биморфных зеркалах комбинированного типа. Показано, что использование методики тренировки пьезопластин путем подачи управляющих напряжений на электроды по специальному алгоритму может значительно улучшить начальную плоскостность корректора. Это позволяет применять данный тип гибких зеркал в мощных лазерных комплексах, создаваемых в том числе для получения управляемого термоядерного синтеза.

Ключевые слова: деформируемое зеркало, биморфный электрод, пьезокерамический актюатор.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.24.61756.8588

Современные лазерные комплексы, предназначенные для проведения исследований взаимодействия сверх-сильных электромагнитных полей с веществом и как конечная цель для получения управляемого лазерного термоядерного синтеза, предполагают наличие силовых оптических элементов и световых пучков с поперечным размером в десятки сантиметров. При этом абберации в таких системах носят крупномасштабный характер [1,2]. Именно поэтому в большинстве подобных комплексов нашли применение именно биморфные управляемые зеркала [3,4]. Особенностью такого типа корректоров является возможность формирования и компенсации низших аббераций волнового фронта светового излучения с использованием достаточно ограниченного числа управляющих элементов — электродов. Это связано с модальным характером деформации поверхности биморфного зеркала, возникающей в результате подачи управляющих напряжений на отдельный электрод или группу электродов. Подобные гибкие зеркала очень эффективно воспроизводят традиционные оптические абберации низкого порядка (дефокусировка, астигматизм, кома, сферическая абберация и т.д.), которые в основном характерны для излучения современных импульсных лазеров. Особенностью биморфных корректоров является большое отношение диаметра зеркала к его толщине, которое может достигать 40 к 1. Это создает сложности как при полировке стеклянной подложки, так и при установке и креплении зеркала в оправе. Решение данных проблем уже обсуждалось в наших работах [5–7]. Однако существует и еще одна проблема, которая, как оказалось, свойственна именно широкоапертурным биморфным зеркалам, — проявление так называемого эффекта „пропечатывания“ пьезокерамических пластин („print-through effect“). Наличие этого эффекта обычно характерно для зеркал с отдельными „толкающими“ приводами, включая мембранные корректоры [8,9], на

отражающей поверхности которых формируется паразитная периодическая структура, повторяющая геометрию расположения управляющих приводов, своего рода дифракционная решетка. При фокусировке излучения это не позволяет получить хорошее фокальное пятно, близкое к дифракционному [10]. Однако биморфные малоапертурные зеркала (до 240 mm в диаметре) лишены такого эффекта просто потому, что в них нет никаких оптико-механических неоднородностей и используются два-три сплошных и однородных склеенных между собой элемента: относительно толстая стеклянная подложка (толщиной до 5 mm) и тонкие пластины из пьезокерамики (до 0.7 mm). Здесь отсутствуют какие-либо дополнительные элементы, которые способны „тянуть“ или дополнительно деформировать отражающую зеркальную пластину на границе раздела „зон влияния“ электродов. Единственная реальная абберация, которая может наблюдаться в данном случае, — это именно дефокусировка, вызванная большим отношением диаметра к толщине всей конструкции (сила тяжести в данном случае тоже играет свою роль). Но практически все современные лазерные комплексы уже требуют использования корректоров волнового фронта с апертурой 600 mm и более. Современные технологические возможности производства тонких пьезокерамических дисков ограничены размером 220–240 mm. И поэтому приходится применять мозаичную структуру расположения пьезокерамики и использовать не одну пьезопластину, а набор отдельных пластин, приклеенных к пассивной подложке (рис. 1, а), для создания широкоапертурных биморфных корректоров волнового фронта.

В работе [11] мы уже представляли результаты наших исследований широкоапертурного, так называемого комбинированного гибкого зеркала (биморфный прямоугольный корректор крепился по периферии на отдельные управляемые пьезоп приводы). Начальная плоскост-

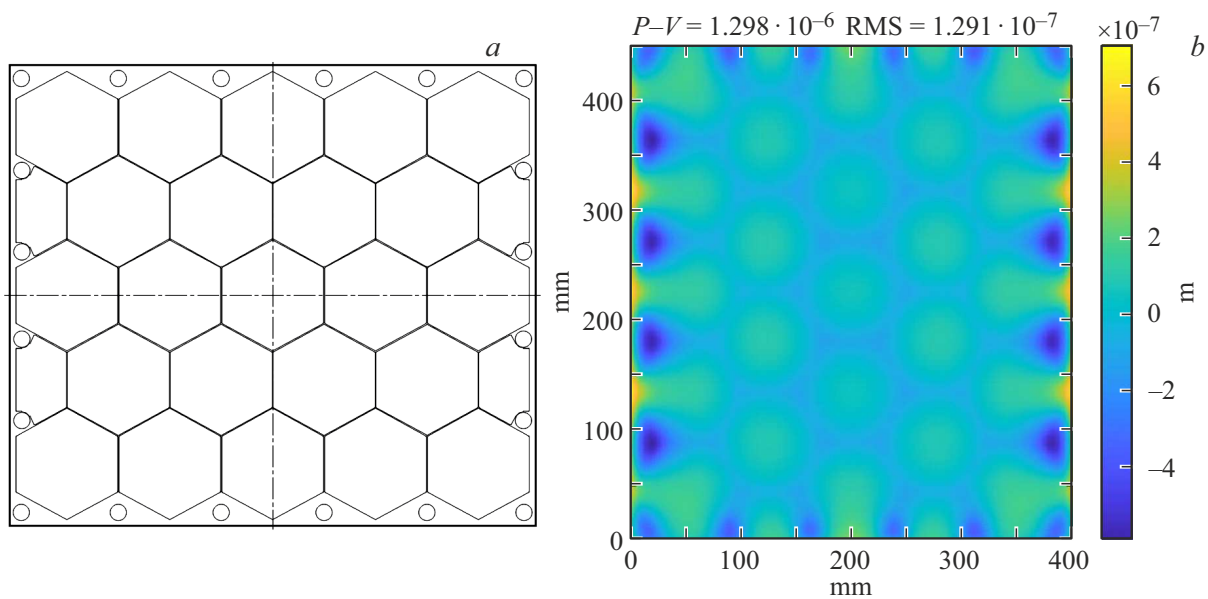


Рис. 1. Схема расположения гексагональных пьезопластин на обратной поверхности стеклянной подложки (а) и результат моделирования деформации поверхности зеркала при его нагреве на 50 °С (до температуры 70 °С) (b). Максимальное отклонение поверхности от плоскости ($P-V$) составляет 1.3 μm или по СКО 129 nm.

ность такого корректора составляла 1.5 μm , и в этом случае проблем с „пропечатыванием“ биморфных пьезопластин не наблюдалось. Сам процесс изготовления данного типа гибкого зеркала включает в себя приклеивание тонких пьезокерамических дисков к стеклянной подложке и финишную оптическую полировку биморфной пластины (остаточная ошибка по амплитуде ($P-V$) не более 1 μm). Далее следуют низкотемпературная (до 80 °С) технологическая подготовка полированной подложки к напылению, сам процесс нанесения отражающего покрытия и жесткое крепление всей конструкции к пьезоприводам-толкателям. При этом после нанесения диэлектрического покрытия поверхность зеркала оказывается сильно деформированной, на фоне общей кривизны и астигматизма (до 30–40 μm) появляются и весьма значительные локальные деформации. Начинает проступать структура отдельно приклеенных пьезокерамических гексагональных пластин. Как показало компьютерное моделирование деформации зеркальной поверхности для различных этапов технологической цепочки, при нагревании биморфной конструкции должно уже наблюдаться „пропечатывание“ отдельных пьезопластин (рис. 1, b).

При этом амплитуда наведенных деформаций поверхности зависит от температуры, и среднеквадратичное отклонение (СКО) от плоскости составляет порядка 100–150 nm для нагрева зеркала на 50 °С. В расчетах не учитывалось наличие клеевого соединения между пьезокерамикой и стеклянной подложкой. Но, как показывают эксперименты, именно наличие клея и изменение его свойств при нагреве приводят к остаточным ошибкам деформации поверхности зеркала и появлению эффекта

„пропечатывания“ уже после остывания конструкции. Также моделирование показало, что подачей соответствующих управляющих напряжений на электроды пьезопластины невозможно компенсировать такого рода температурные деформации поверхности ввиду модального характера функций отклика электродов биморфного зеркала.

Нами была изготовлена серия биморфных корректоров размером 468 × 410 mm с мозаичной структурой пьезопластин в соответствии с технологией, описанной выше. Типичный профиль поверхности одного из таких зеркал после финишной полировки представлен на рис. 2, a. Неплоскостность поверхности составила порядка 1 μm ($P-V$) или 0.15 μm (СКО) после вычитания дефокусировки и астигматизма. При этом локальные деформации поверхности, связанные с расположением отдельных пьезопластин, не наблюдаются. На эти зеркала наносилось многослойное отражающее диэлектрическое покрытие, на всех этапах нанесения которого температура процесса строго контролировалась и максимальный нагрев зеркальной подложки не превышал 70 °С. После напыления наблюдалась значительная по амплитуде общая кривизна поверхности зеркал, после вычитания которой отчетливо проступила сетка приклеенных пьезопластин (рис. 2, b) — остаточная деформация поверхности, связанная с нагревом биморфного корректора.

Амплитуда провалов изменяется в пределах от 50 до 800 nm. Примерно через месяц внутренние механические напряжения в многослойных диэлектрических покрытиях релаксируют приблизительно на 2/3. При монтаже зеркальной подложки на пьезоприводы-толкатели

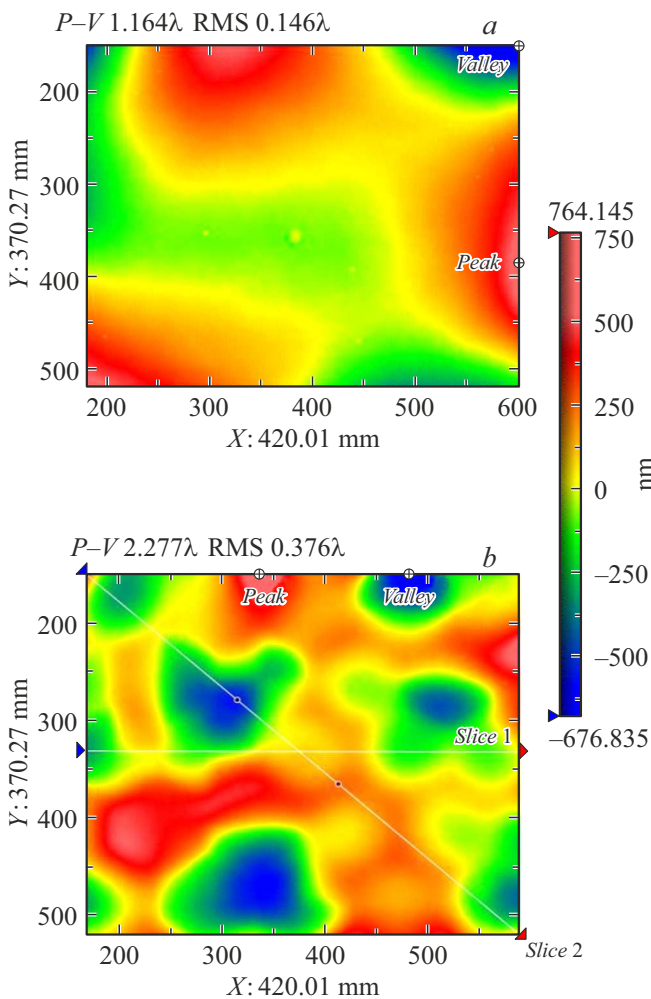


Рис. 2. Профиль поверхности биморфной пластины после полировки (а) и эффект „пропечатывания“ сетки пьезопластин после напыления диэлектрического покрытия (СКО составляет 380 nm) (b).

вносятся дополнительные деформации, которые впрочем достаточно легко компенсируются теми же периферийными пьезоприводами. Таким образом удастся получить почти плоскую поверхность деформируемого зеркала с амплитудой $P-V$ порядка $1.5 \mu\text{m}$. При этом проблема „пропечатывания“ отдельных пьезопластин остается.

Сразу необходимо отметить, что любые неоднородности или остаточные напряжения как внутри (например, свили), так и вне (локальные неоднородности) полируемых плоскостей оптических элементов всегда приводят к остаточным ошибкам. И вопрос только один: насколько хорошо полученный профиль полированной поверхности будет соответствовать требуемому? Согласно критерию Марешаля, оптическую систему можно считать идеальной, если суммарные aberrации в ней не превышают $1/14$ длины волны светового излучения по СКО [12]. Созданные нами деформируемые зеркала предназначены для использования в лазерном комплексе с длиной волны

$1.053 \mu\text{m}$, т.е. отклонение сформированного ими волнового фронта от идеального с точки зрения фокусировки лазерного излучения на мишень не должно превышать $70-75 \text{ nm}$ (СКО). Между тем остаточная ошибка, возникающая в результате эффекта „пропечатывания“ сетки пьезопластин биморфного зеркала (136 nm), почти в 2 раза превышает допустимую (рис. 3, а).

Эксперимент с установкой данного зеркала в реальный оптический тракт показал, что фокальное пятно, сформированное после отражения от данного корректора, имеет форму, далекую от дифракционной, и профилю поверхности гибкого зеркала (рис. 3, а) соответствует распределение интенсивности в плоскости фокусировки, представленное на рис. 3, б. Фактор Штреля в данном случае составлял 0.11, что, естественно, очень далеко от требуемого значения > 0.8 .

Для решения проблемы, для сглаживания остаточных aberrаций, нами предлагается использовать метод тренировки адаптивных зеркал. Поскольку поверхность корректора после полировки была без каких-либо значительных локальных искажений, после напыления и нагрева при последующей релаксации она должна была бы вернуться именно к исходному состоянию. Просто индуцированные механические напряжения должны релаксировать. Для ускорения данного процесса мы поместили зеркало в 24" интерферометр Физо (Zygo Corporation, CT, USA) и хаотическим образом подавали различные наборы управляющих напряжений в диапазоне от -100 до $+200 \text{ V}$, при этом сами напряжения устанавливались в шагающем режиме с „мягким“ шагом $1-3 \text{ V}$ с „замораживанием“ в конечной точке на некоторое время или волнообразным изменением состояний пьезопластин друг относительно друга. После десятков тысяч таких итераций (тренировка каждого зеркала занимала до десяти дней) поверхность зеркала удалось исправить: мы компенсировали остаточные aberrации, уменьшив их амплитуду до требуемых параметров (рис. 4, а), амплитуда остаточных aberrаций $0.53 \mu\text{m}$, при том что СКО составило 52 nm . Данные параметры зеркала позволили получить расчетное значение фактора Штреля, равное 0.85. На рис. 4, б представлено распределение интенсивности в фокальной плоскости фокусирующей линзы, соответствующее данному профилю зеркала. Более 80 % интенсивности сосредоточено в дифракционно ограниченной области.

В заключение отметим, что характерной особенностью биморфных корректоров волнового фронта является то, что чем дольше они „работают“ в системах коррекции aberrаций, тем эффективнее выполняют свои функции и лучше оказывается их целевая поверхность. Это связано в первую очередь с очень большим отношением диаметра к толщине и вытекающими отсюда проблемами временных изменений поверхности зеркал.

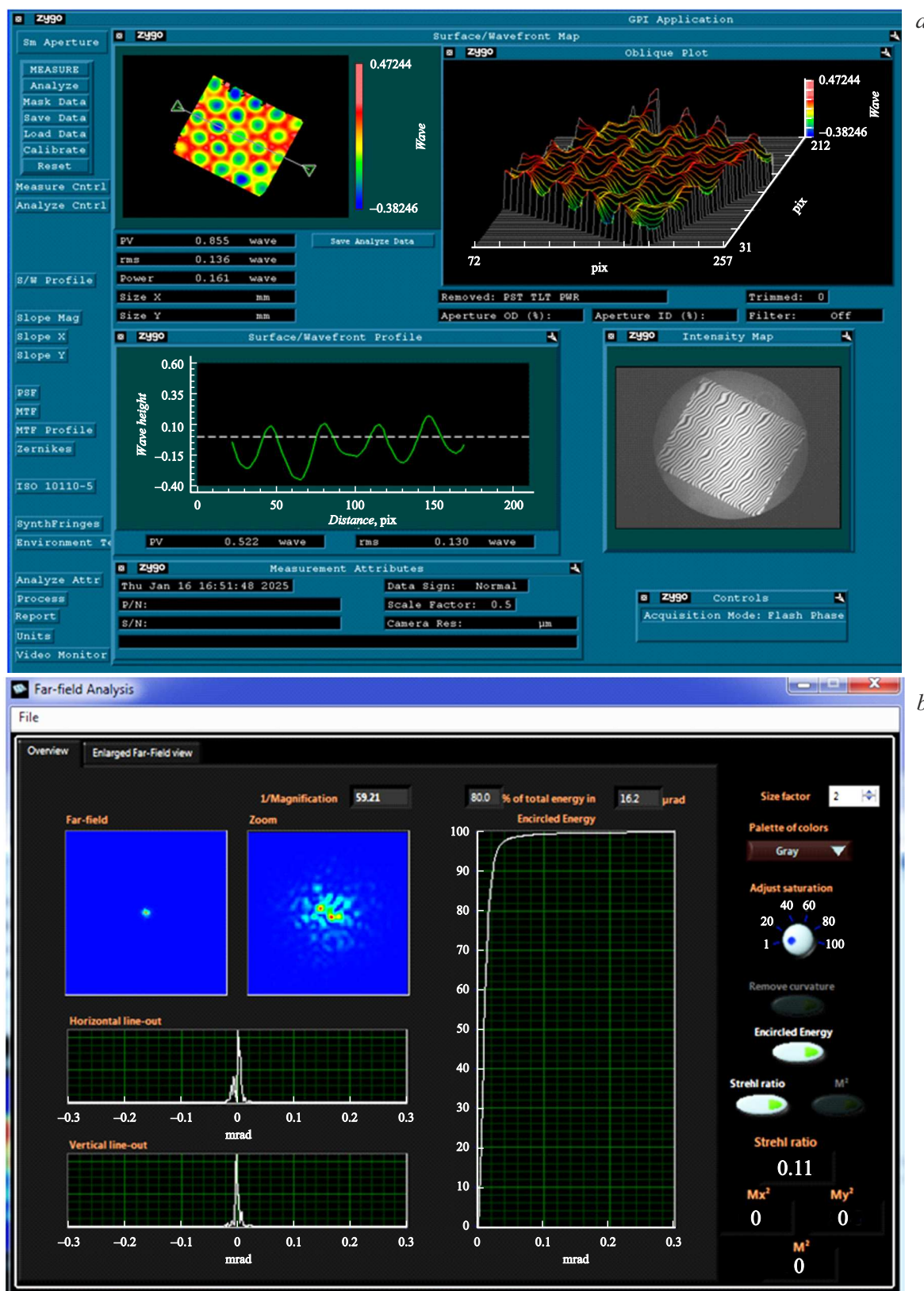


Рис. 3. Форма поверхности зеркала после установки в оправе и юстировки периферийными пьезоприводами (СКО составляет 136 nm) (*a*) и экспериментально измеренное распределение интенсивности супергауссова лазерного пучка после отражения от адаптивного зеркала в фокусе линзы (*b*).

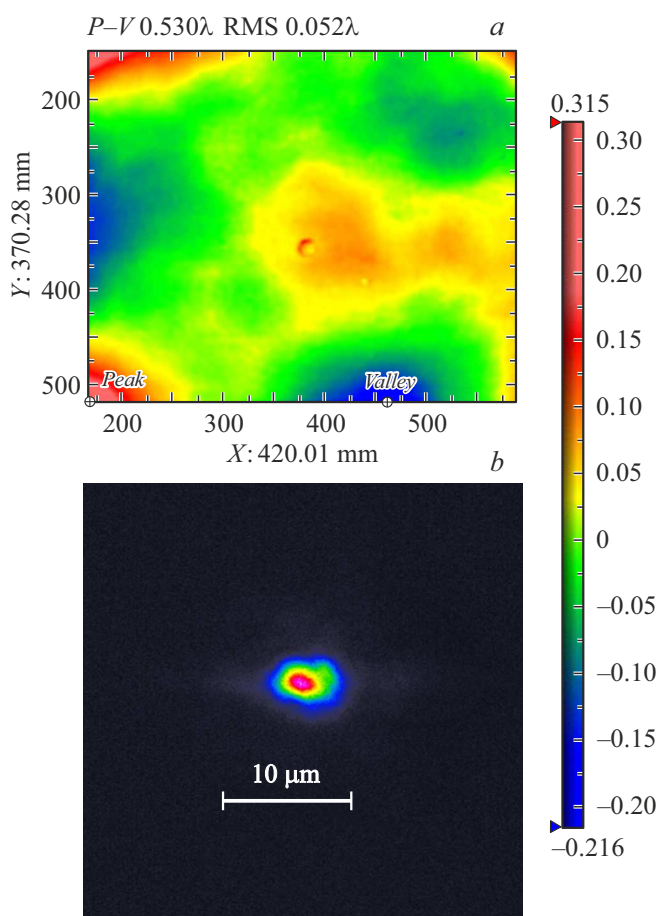


Рис. 4. Профиль поверхности комбинированного биморфного зеркала после процесса тренировки (СКО составляет 52 nm) (a) и распределение интенсивности в фокальной плоскости фокусирующей линзы (b).

Благодарности

Авторы выражают благодарность компании Okamoto Corporation (Япония) за оказанную помощь в финишной полировке и нанесении отражающего покрытия на зеркальные подложки широкоапертурных деформируемых зеркал биморфного и комбинированного типов, а также коллективу Университета г. Осака (Япония) за предоставленную возможность проведения экспериментов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 25-19-00701), а также госзадания „Разработка методов коррекции светового излучения в сильно турбулентной и рассеивающей тропосфере Земли“ (№ 125012400749-3).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Zheng, X. Zhang, X. Wei, F. Jing, Z. Sui, J. Su, M. Li, Z. Peng, S. He, B. Chen, X. Jiang, C. Ma, D. Wu, L. Guo, L. Ding, X. Zhang, K. Zheng, H. He, W. Liu, X. Yang, D. Fan, W. Zhang, *J. de Phys. IV*, **133**, 607 (2006). DOI: 10.1051/jp4:2006133121
- [2] R.A. Zacharias, N.R. Beer, E.S. Bliss, S.C. Burkhart, S.J. Cohen, S.B. Sutton, R.L. Van Atta, S.E. Winters, J.T. Salmon, M.R. Latta, C.J. Stolz, D.C. Pigg, T.J. Arnold, *Opt. Eng.*, **43** (12), 2873 (2004). DOI: 10.1117/1.1815331
- [3] V. Samarkin, A. Alexandrov, I. Galaktionov, A. Kudryashov, A. Nikitin, A. Rukosuev, V. Toporovsky, J. Sheldakova, *Appl. Sci.*, **12**, 1144 (2022). DOI: 10.3390/app12031144
- [4] G. Cheriaux, J.-P. Rousseau, F. Burgy, J.-C. Siquin, J.-M. Lurgn, C. Guillemard, *Proc. SPIE*, **6584**, 658405 (2007). DOI: 10.1117/12.722527
- [5] A.B. Котов, С.Е. Перевалов, М.В. Стародубцев, Р.С. Земсков, А.Г. Александров, И.В. Галактионов, А.В. Кудряшов, В.В. Самаркин, А.А. Соловьев, *Квантовая электроника*, **51** (7), 593 (2021). [A.V. Kotov, S.E. Perevalov, M.V. Starodubtsev, R.S. Zemskov, A.G. Alexandrov, I.V. Galaktionov, A.V. Kudryashov, V.V. Samarkin, A.A. Soloviev, *Quantum Electron.*, **51** (7), 593 (2021). DOI: 10.1070/QEL17542].
- [6] A. Kudryashov, A. Alexandrov, A. Rukosuev, V. Samarkin, P. Galarneau, S. Turbide, F. Châteauneuf, *Appl. Opt.*, **54** (14), 4352 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.004352
- [7] A. Kudryashov, V. Samarkin, A. Alexandrov, J. Sheldakova, P. Romanov, *Proc. SPIE*, **8960**, 89601G (2014). DOI: 10.1117/12.2046497
- [8] G. Vdovin, P.M. Sarro, *Appl. Opt.*, **34** (16), 2968 (1995). DOI: 10.1364/AO.34.002968
- [9] J. Ma, B. Li, J. Chu, *Proc. SPIE*, **7657**, 76570G (2010). DOI: 10.1117/12.866304
- [10] С.А. Бельков, В.О. Васюкевич, Г.Н. Качалин, А.О. Липатов, А.Н. Маначинский, Ю.В. Шагалкин, А.В. Яхлов, *Квантовая электроника*, **55** (1), 1 (2025). [S.A. Belkov, V.O. Vasyukevich, G.N. Kachalin, A.O. Lipatov, A.N. Manachinsky, Yu.V. Shagalkin, A.V. Yakhlov, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **52** (Suppl 4), S377 (2025). DOI: 10.3103/S1068335625603000].
- [11] V. Samarkin, A. Alexandrov, G. Borsoni, T. Jitsuno, P. Romanov, A. Rukosuev, A. Kudryashov, *High Power Laser Sci. Eng.*, **4**, e4 (2016). DOI: 10.1017/hpl.2016.3
- [12] C.J.R. Sheppard, *Opt. Lett.*, **39** (8), 2354 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.002354