

УДК 681.2.002(031)

## ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СЕНСОРНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

*В. П. Маслов*

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,  
45, Проспект Науки, Киев, Украина  
Тел/факс: +380(44)2650555, E-mail: maslov@isp.kiev.ua

### Аннотация

#### ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СЕНСОРНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

*В. П. Маслов*

Современные оптико-электронные приборы (ОЭП) широко используются в космических условиях и в других экстремальных условиях. Одна из особенностей широко применяемых перспективных оптических и полупроводниковых материалов является их хрупкость, то есть детали из них разрушаются под действием механических воздействий без следов пластического деформирования. Такое негативное свойство как хрупкость для оптических и полупроводниковых деталей и деталей чувствительных элементов является необходимым для обеспечения стабильности их геометрических и физических характеристик. Анализ причин отказов ОЭП показал, что разрушение деталей из хрупких материалов происходит в местах их соединений между собой или с другими деталями. Разрушение начинается от периферийных участков детали: шлифованные поверхности торцов и мест склейки. На основании разработанного подхода внедрены физико-технологические рекомендации по обеспечению работоспособности сенсорных оптико-электронных приборов. Эти рекомендации включают:

- физико-технологические способы формирования поверхностей деталей с минимальным нарушенным слоем;
- методы удаления или модифицирования нарушенного слоя;
- применение специальных механических крепежных деталей, обеспечивающих демпфирование и релаксацию внешних воздействий, например, из сплавов с механизмом деформирования путем двойникования.

При внедрении указанного подхода и разработанных рекомендаций в промышленность были обеспечены высокие эксплуатационные характеристики таких приборов как лазерный гироскоп и приборы инфракрасной техники.

**Ключевые слова:** Хрупкость, нарушенный поверхностный слой, стабильность, работоспособность, крепление, демпфер.

## Анотація

### ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРНИХ ПРИБЛАДІВ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

*В. П. Маслов*

Сучасні оптико-електронні прилади (ОЕП) широко використовуються в космосі і в інших екстремальних умовах. Однією з особливостей широко застосовуваних перспективних оптичних і напівпровідникових матеріалів є їхня крихкість, тобто деталі з них руйнуються під дією механічних впливів без слідів пластичного деформування. Така негативна властивість як крихкість для оптичних і напівпровідникових деталей і деталей чутливих елементів є необхідним для забезпечення стабільності їх геометричних і фізичних характеристик. Аналіз причин відмовлень ОЕП показав, що руйнування деталей з крихких матеріалів відбувається в місцях їхніх з'єднань між собою або з іншими деталями. Руйнування починається від периферійних ділянок деталі: шліфованих поверхонь торців і місць склейки. На підставі розробленого підходу впроваджені фізико-технологічні рекомендації з забезпечення працездатності сенсорних оптико-електронних приладів. Ці рекомендації включають:

- фізико-технологічні способи формування поверхонь деталей з мінімальним порушеним шаром;
- методи видалення або модифікування порушеного шару;
- застосування спеціальних механічних деталей, що забезпечують демпфірування і релаксацію зовнішніх впливів, наприклад, зі сплавів з механізмом деформування шляхом двійникування.

При впровадженні зазначеного підходу і розроблених рекомендацій у промисловість були забезпечені високі експлуатаційні характеристики таких приладів як лазерний гіроскоп і прилади інфрачервоної техніки.

**Ключові слова:** Крихкість, порушений поверхневий шар, стабільність, працездатність, кріплення, демпфер.

## Summary

### PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF MAINTENANCE OF SERVICEABILITY OF OPTICAL-ELECTRONIC SENSORY DEVICES UNDER EXTREME CONDITIONS

*V. P. Maslov*

Modern optical-electronic devices (OED) are widely used in space and other industries with extreme conditions. One of features of optical and semiconductor materials are their fragility, because details from them collapse under action of mechanical and temperature loading without traces of plastic deformation. Such negative property as fragility for optical and semiconductor details and sensitive elements is necessary for maintenance of stability of their geometrical and physical characteristics. The analysis of the reasons of refusals of OED has shown, that destruction of details from fragile materials occurs in places of their connections among themselves or to other details. Destruction begins from peripheral zones of a detail: the grinded surfaces of edges and mounting places. On the basis of the developed physical and technological recommendations for maintenance of sensors and optical-electronics devices serviceability are introduced. These recommendations include:

- physical and technological ways for formation of detail surfaces of with the minimal broken layer;
- methods of removal or modifying of the broken layer;
- application of the special mechanical dampers providing shock absorption and a relaxation of external influences, for example, making from alloys with the mechanism of deformation by twinning.

The specified approach and developed recommendations provide for high operational characteristics of such devices as a laser gyroscope and devices for infrared techniques.

**Keywords:** The fragility, the broken superficial layer, stability, serviceability, mount, damper.

Современные оптико-электронные приборы содержат, как правило, оптический блок, блок чувствительного фотоприемного устройства и электронный блок обработки информации. Количество оптических деталей и деталей фотоприемного устройства не превышает 5-10% в составе прибора, но именно эти детали определяют его основные технические характеристики и работоспособность. Если рассмотреть оптические материалы, используемые при производстве оптических приборов, то можно отметить большое разнообразие их как по количеству (несколько сотен) и по физическому строению (аморфные стеклообразные вещества, кристаллы, оптические керамики и стеклокерамики), так и по физическим свойствам. Необходимость обеспечения в первую очередь оптических характеристик деталей приводит к тому, что другие физические характеристики, например, коэффициент температурного расширения (КТР) или механическая прочность, не могут быть оптимизированы в одном материале. Поэтому в информационном оптическом канале в реальных конструкциях приборов сочетаются детали с различными значениями КТР и уровнем механической прочности. Представляет интерес рассмотреть развитие оптических приборов в сочетании с развитием оптических материалов. На рис. 1 показаны этапы развития зеркальных телескопических систем в зависимости от освоения новых оптических материалов.

С конца 60-х годов XX века развитие таких зеркальных систем связано с развитием нетрадиционных материалов. Таким образом, процесс поиска и разработки новых оптических материалов продолжается и во многом определяет успехи оптического приборостроения.

Рассматривая оптические материалы, широко применяемые сегодня, и перспективные нетрадиционные материалы, можно отметить одну из особенностей, а именно: эти материалы являются хрупкими, т. е. разрушаются при механических воздействиях без следов пластического деформирования.

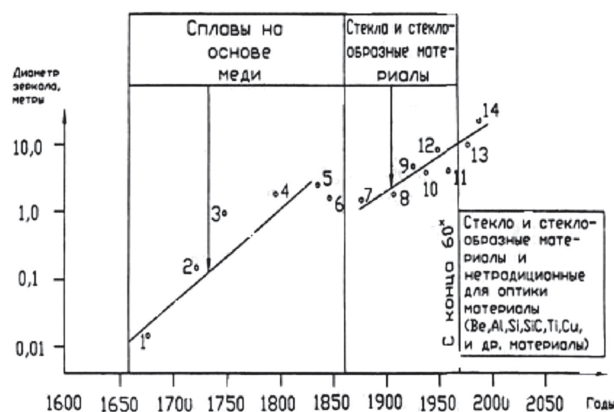


Рис. 1. Этапы развития зеркальных оптических телескопических систем [1].

Такое негативное свойство как хрупкость для оптических деталей и деталей чувствительных элементов является необходимым и обеспечивает стабильность геометрических и физических характеристик деталей и приборов в целом. Современные приборы широко используются в космических условиях, при больших уровнях механических и температурных воздействий, которые в общем случае можно назвать как экстремальные. При температурных и/или механических воздействиях (особенно при экстремальных условиях), в процессе эксплуатации ответственные детали оптического канала могут разрушаться, что в конечном итоге, прерывает или прекращает функционирование прибора. Анализ причин отказов оптико-электронных приборов показал, что разрушение оптических деталей или деталей чувствительного элемента происходит в местах их соединений между собой или с корпусными деталями. При этом разрушение начинается на периферийных участках деталей, на так называемых нерабочих поверхностях: шлифованные торцы и места (шлифованные) склейки с другими деталями.

Целью данной работы является исследование структуры и свойств поверхности реальных оптических деталей и обеспечение их прочности методами физико-технологической обработки.

Проведенные исследования структуры поверхностного нарушенного механической обработкой слоя показали общие закономерности зависимости прочностных свойств деталей от структуры поверхности для хрупких оптических материалов. Рассмотрим обнаруженную зависимость более подробно.

Непрерывность во времени процесса накопления предразрушений при абразивной обработке поверхности деталей из хрупких материалов и поверхностного дисперсирования предполагает наличие дефектной приповерхностной структуры, характеризующейся некоторым распределением дефектов  $\rho(x)$  по глубине. По данным наших исследований распределение дефектов в стеклообразных, кристаллических и стеклокристаллических материалах методом эллипсометрии (рис. 2) [2,3,4], а также в кристаллических, керамических и стеклокерамических материалах рентгенографическим методом (рис. 3) [5] можно сделать вывод, что распределение дефектов и микронапряжений имеет монотонный убывающий характер, который можно описать экспоненциальной зависимостью:

$$\rho(x) - \rho_{\infty} = (\rho_0 - \rho_{\infty}) \exp(-kx), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — максимальное значение плотности дефектов и микродеформаций на обрабатываемой поверхности;

$\rho_{\infty}$  — плотность дефектов в глубине ненарушенного обработкой образца;

$k$  — величина постоянная для данного материала и условий обработки.

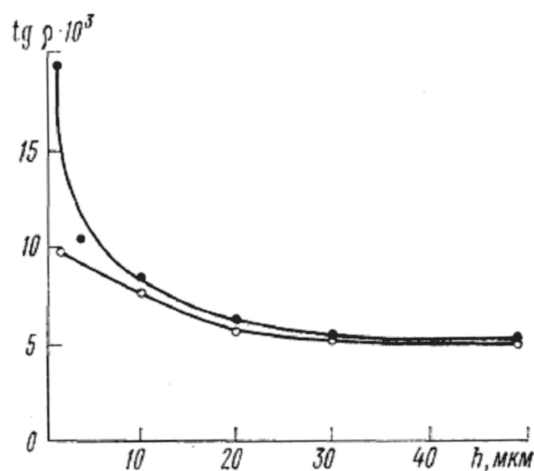


Рис. 2. Распределение приповерхностных дефектов в кристаллическом кварце, обработанном абразивом M28: ° — до отжига, • — после отжига при температуре 600°C в течение 10 часов [4].

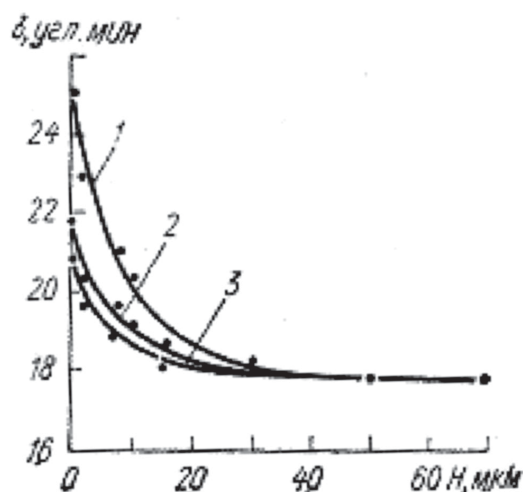


Рис. 3. Зависимость полуширины  $V$  дифракционной кривой отражения (1010) от глубины сполированного слоя в ситалле CO115M после обработки абразивами: 1-M28; 2 — M10; 3 — M5.

Из общих представлений и экспериментальных данных коэффициент  $k$  в формуле (1) пропорционален таким физическим величинам как вязкость хрупкого разрушения материалов.

$$K_{lc} = (\gamma E)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — удельная поверхностная энергия,  $E$  — модуль упругости.

Исследовано, что глубина нарушенного поверхностного слоя существенно влияет на механическую прочность образцов из хрупких неметаллических материалов. Экспериментальные результаты показали, что прочность образцов после механической обработки  $\sigma_L$  можно оценить по формуле:

$$\sigma_L = \sigma_0 \exp(-BL), \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  — прочность отполированных образцов,  $L$  — глубина нарушенного слоя.

Прецизионные исследования [6] микроползучести образцов оптических стекол типа крона, стеклокерамики CO115M и оптического кварца показали, что даже при комнатной температуре при воздействии небольших постоянных механических нагрузках (равных 0,1 от разрушающих), в поверхностных слоях возникает остаточная деформация, накопление которой приводит к развитию критической трещины и разрушению образцов. Эти исследования также показали, что величина микроползучести образцов зависит, как от физических свойств материа-

лов, из которых она выполнена, так и от состояния поверхностного слоя. Например, шлифованные образцы имели максимальные значения, полированные — средние, а травленные — наименьшие значения повер-

хностных микродеформаций. При этом низкотемпературный отжиг или химическое полирование (рис. 4) [7] существенно уменьшают величину остаточных деформаций за счет уменьшения дефектов.

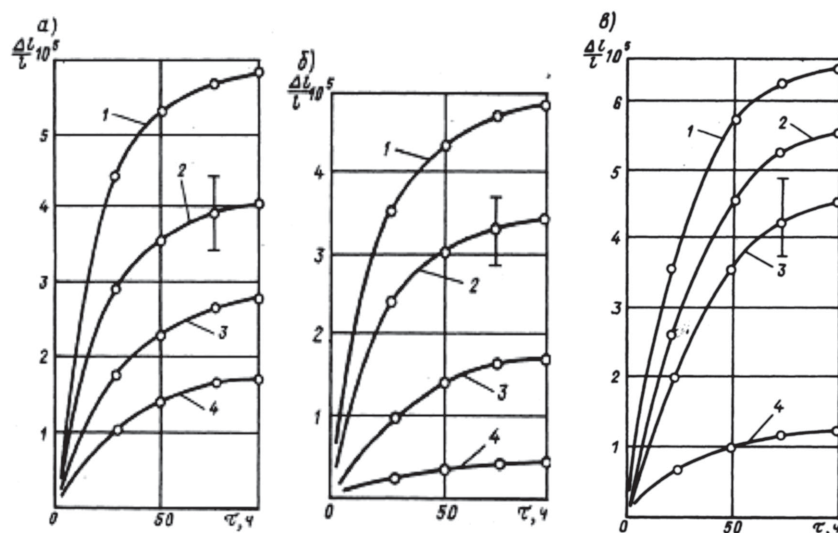


Рис. 4. Ползучесть при нагрузке, равной 0,1 от ее разрушающей величины, ситалла СО115М (а), кварцевого стекла (б), оптических стекол ТК14, К8, ЛК5, БК10 (в) в зависимости от качества обработки поверхности образцов: 1 — абразивом М28; 2 — абразивом М10; 3 — полирование полиритом на смоляном полировальнике; 4 — абразивом М10 и последующее травление в растворе фтористо-водородной кислоты.

Таким образом, исследования по микроползучести показали возможность обеспечения прочности и работоспособности деталей из хрупких материалов технологическими методами, а именно технологией механической и химической обработки поверхностей, предназначенных под соединение, и/или низкотемпературным отжигом ответственных деталей перед сборкой.

Проблемы, возникающие в производстве при креплении (сборке) ответственных деталей и узлов оптико-электронных приборов, практически не описаны в литературе, а их решения относятся к категории “ноу-хау” производителей этих приборов. Исключением является монография [8], изданная SPIE, в которой приведены принципы и расчеты по креплению ответственных оптических деталей, таких как главное облегченное зеркало космического телескопа Hubble и других ответственных приборов. Однако приведенные в монографии результаты в большинстве описывают соединения через эластичные клеи. В данной работе приведены рекомендации по обеспечению соединения деталей из хрупких материалов, отли-

чающихся по КТР, с учетом результатов влияния структуры поверхностного слоя на прочность и возможность упрочнения поверхности технологическими методами при склейке с использованием жестких эпоксидных смол (клей типа К-300; К-400). Эффективным методом упрочнения деталей в клеевом соединении является химическое полирование поверхностей, контактирующих в клеевом соединении. Кроме того, поверхности, предназначенные для клеевого соединения, могут быть модифицированы специальными покрытиями.

Например, клеевое соединение, в котором были реализованы разработанные рекомендации для деталей из оптической стеклокерамики с практическим нулевым КТР и детали из стекла с КТР отличающимся на два порядка, обеспечивало работоспособность лазерного гироскопа при климатических воздействиях  $+65^{\circ}\text{C} \div -50^{\circ}\text{C}$  и механических ударах до 120g. Для оптических элементов, работающих при криогенных температурах, разработан перспективный способ теплопроводного склеивания материалов с разными КТР [9].

Одним из перспективных направлений обес-

печения работоспособности оптико-электронных приборов, работающих в условиях ударных или вибрационных воздействий, является использование демпфирующих материалов в деталях крепления или корпусных деталях. Проведенные исследования показали перспективность использования для этих целей сплава НТ-1 (никель-титан), в котором эффект демпфирования реализуется за счет протекания деформаций путем двойникования. Применение этого сплава для изготовления корпусных и/или крепежных элементов конструкций для закрепления лазерного гироскопа или других оптических сенсоров позволяет уменьшить в 2÷10 раз механические воздействия на чувствительный датчик. Такой способ виброгасящего крепления в перспективной конструкции фотоприемного устройства предложен в патенте [10].

### Выводы

1. Современные и перспективные материалы оптико-электронных сенсорных устройств и приборов наряду с функционально необходимыми заданными оптическими свойствами обладают хрупкостью, что с одной стороны обеспечивает стабильность геометрических и оптических характеристик деталей, а с другой стороны — создает проблему обеспечения их работоспособности при экстремальных внешних условиях эксплуатации (температурные и механические воздействия, включая ударные и циклические).

2. Обобщение результатов исследования структуры и свойств поверхностного слоя деталей из оптических материалов и материалов чувствительных элементов (аморфные стеклообразные материалы, кристаллы, оптическая керамика и оптическая стеклокерамика) показало определяющее влияние поверхностного слоя, нарушенного в процессе механической обработки, на механическую прочность и стабильность прецизионных деталей оптико-электронных приборов.

3. На основании разработанного подхода внедрены физико-технологические рекомендации по обеспечению работоспособности сенсорных оптико-электронных приборов. Эти рекомендации включают:

– физико-технологические способы формирования поверхностей деталей с минимальным нарушенным слоем;

– методы удаления или модифицирования нарушенного слоя;

– применение специальных механических крепежных деталей, обеспечивающих демпфирование и релаксацию внешних воздействий, например, из сплавов с механизмом деформирования путем двойникования.

### Литература

1. С. Любарский, Из истории оптических зеркал // Научно-технический и гуманитарный сборник МАК, Москва, 2004г., № 1. — С. 80-87.
2. В. П. Маслов, Т. С. Мельник, Взаимосвязь остаточной эллиптичности поляризации света, отраженного от полированных оптических стекол, с физико-механическими свойствами их поверхностей // Оптико-механическая промышленность, 1991г., № 7. — С. 75-76.
3. В. П. Маслов и др., Исследование состояния поверхностного слоя ситалла после механической обработки // Оптико-механическая промышленность, 1978г., № 8. — С. 70-71.
4. В. П. Маслов, Т. С. Мельник, В. А. Одарич, Эллипсометрические исследования поверхности кристаллического кварца после механической обработки // Оптико-механическая промышленность, 1985г., № 4. — С. 1-2.
5. Н. Я. Горидько, В. П. Маслов и др., Исследование глубины поверхностного слоя, нарушенного в процессе механической обработки кристаллов LiF и CdSb // Оптико-механическая промышленность, 1980г., № 9. — С. 13-15.
6. А. А. Дворский, В. П. Маслов, В. Н. Новиков, Влияние состояния поверхности на микрополучность оптического ситалла, плавленного кварца и некоторых силикатных стекол типа крон при комнатной температуре // Проблемы прочности, 1987г., № 6. — С. 91-95.
7. В. П. Маслов, А. А. Дворский, Поверхностная обработка стекла и ситалла и их механическая прочность // Стекло и керамика, 1991г., № 2. — С. 12-13.
8. Paul R. Yoder, Jr. Mounting, Optics in Optical Instruments // SPIE PRESS, Order # 110, 2002. — 589 p.
9. Сизов Ф. Ф., Маслов В. П., Забудський В. В., Голенков О. Г., Спосіб теплопровідного склеювання матеріалів з різними коефіцієнтами температурного розширення, Деклараційний патент України на винахід №65831 А, 7 С03С27/10 опубліковано 15. 04. 2004. — Бюл. №4.
10. Сизов Ф. Ф., Маслов В. П. та ін., Фото приймальний прилад тепловізора, Деклараційний патент України на винахід №56653 А, 7 Н01L27/14, Н01L31/18, опубліковано 15. 05. 2003. — Бюл. №5.