

нс. При увеличении плотности энергии облучения до 1.4 Дж/см^2 максимальная температура поверхности возрастает до $\approx 1770 \text{ К}$, глубина плавления увеличивается до 320 нм , т. е. полностью плавится *Ge*, время существования расплава достигает 200 нс . Отметим, что на стадии отвердевания на графике температуры наблюдается плато ($T = 1210 \text{ К}$), в это время происходит обратный фазовый переход расплав \leftrightarrow кристалл. При дальнейшем увеличении плотности энергии характер зависимостей меняется.

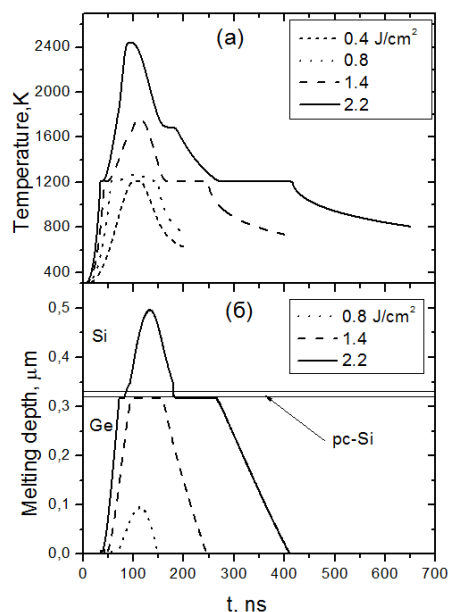


Рисунок 1 – Временные зависимости температуры поверхности и глубины проплавления гетероструктуры *Ge/pc-Si/c-Si* при облучении с указанными плотностями энергий

При плотностях энергии облучения $W \geq 2 \text{ Дж/см}^2$ температура поверхности значительно превышает температуру плавления *c-Si*. При $W = 2.2 \text{ Дж/см}^2$ максимальная температура поверхности $> 2400 \text{ К}$. Поглощенная энергия достаточна, чтобы сначала расплавился слой *Ge*, затем расплавился тонкий слой *pc-Ge* и начала плавиться *Si* подложка. На стадии остывания на температурной кривой наблюдается два плато. Первое плато возникает при температуре плавления монокристаллического *Si* (1685 К) и второе – при температуре плавления *Ge* (1210 К). Первое плато соответствует фазовому переходу расплав *Si* \leftrightarrow кристаллический *Si*. Далее идет остывание расплавленного слоя *Ge* до температуры кристаллизации. Второе плато – фазовый переход расплав *Ge* \leftrightarrow кристаллический *Ge*. Глубина плавления достигает 500 нм , что превышает толщины слоёв германия и поликристаллического кремния, время существования расплава составляет $\sim 370 \text{ нс}$.

Таким образом, в результате моделирования получены данные о температурной динамике, глубинах проплавления и последовательности фазовых переходов в трёхслойных гетероструктурах *Ge/pc-Si/c-Si* при облучении импульсами рубинового лазера. Результаты моделирования показали, что схемы сквозного счёта могут успешно применяться для описания лазерно-индуцированных процессов плавления и отвердевания для многослойных структур.

Литература

1. Harame, D.L. The revolution in SiGe: impact on device electronics / D.L. Harame [et al] // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 224. – P. 9–17.
2. Самарский, А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

УДК 528.8

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Романов Д.В.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в разработке и запуске КА дистанционного зондирования Земли высокого разрешения, примерами которых являются КА GeoEye-1, WorldView-3, WorldView-4. В настоящее время спрос на данные высокого разрешения постоянно увеличивается. Для обеспечения потребителей данными высокого разрешения правительством США было отменено ограничение на пользование данными с разрешением от

$0,5 \text{ м}$. Однако доступ к изображениям с разрешением лучше $0,5 \text{ м}$ остается ограниченным.

В таблице 1 представлены функционирующие и планируемые к выводу на орбиту КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения (до $0,5 \text{ м}$).

Один из основных показателей информативности оптико-электронной системы (ОЭС) дистанционного зондирования Земли из космоса является линейное разрешение на местности

(ЛРМ) – усредненная величина полупериода произвольно ориентированной трехшпальной квадратной миры, каждая шпала которой при известных значениях альbedo фона, контраста миры, угла визирования, обнаруживается наблюдателем на получаемом изображении с вероятностью не менее заданной.

Существует несколько методик определения ЛРМ. В основном методика предварительной оценки ЛРМ основана на определении предельно-разрешаемой пространственной частоты элемента прямоугольной стандартной трехшпальной миры, путем решения сквозного частотно-энергетического уравнения и нахождения предельно-разрешаемой пространственной частоты элемента прямоугольной штриховой миры, при наблюдении изображения которой, воспринимаемое оператором эффективное (визуальное) отношение сигнал-шум (ОСШ) на её отдельном штрихе будет составлять пороговое значение, обеспечивающее требуемую вероятность его распознавания по принятому критерию дешифрируемости.

Альтернативным критерием оценки информативности ОЭС являются уровни NIIRS (9 уровней), классифицирующие качество снимков.

Общее уравнение качества снимков:

$$NIIRS = c_0 + c_1 * \log_{10}(GSD) + c_2 * \log_{10}(RER) + c_3 * \frac{G}{SNR} + c_4 * H$$

где c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты, значения которых приведены в справочных таблицах.

GSD – проекция пикселя на Землю в дюймах;

RER – среднегеометрическое значение величины переходной функции изображения резкого края с учетом функции передачи модуляции (ФПМ) аппаратуры (объектива и фотоприемника), ФПМ атмосферы, ФПМ смаза.

SNR – отношение сигнал/шум для Ламбертовского источника с коэффициентами отражения 7% и 15%.

На качество изображения оказывает влияние наличие «смазов» (случайные и систематические). Ошибки в определении пространственной ориентации осей космического аппарата (КА) и отсутствие их высокоточной стабилизации влияет на оценку величины и направления вектора скорости бега изображения в плоскости фотоприёмного устройства (ФПУ). Значительное несогласование вектора скорости бега изображения с временными режимами считывания информации с ФПУ, особенно для режима временной задержки с накоплением, обуславливает увеличение «смаза» и, как следствие, приводит к снижению качества формируемых ОЭС изображений.

Современные требования, предъявляемые к уровню целевой эффективности систем косми-

ческой разведки наземных объектов, определяют всё возрастающую роль оптико-электронных средств оперативного наблюдения (мониторинга, дистанционного зондирования) в общей совокупности привлекаемых средств. Задачи оперативного космического контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных и антропогенных процессов, процессов стратегического характера и т.д., выдвигают высокие требования к качеству получаемой целевой информации.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики существующих и планируемых к запуску съемочных систем КА ДЗЗ

Наименование КА, страна	Дата запуска	Геометрическое разрешение, м
WorldView-1 (1 КА), США	18.09.2007	ПК: 0,50
GeoEye-1 (1 КА), США	06.09.2008	ПК: 0,41
WorldView-2 (1 КА), США	08.10.2009	ПК: 0,46
WorldView-3 (1 КА), США	13.08.2014	ПК: 0,31
ASNARO (1 КА), Япония	06.11.2014	ПК: 0,50
KOMPSat-3A (1 КА), Южная Корея	25.03.2015	ПК: 0,55
Cartosat-2C-2F (4 КА), Индия	22.06.2016 15.02.2017 23.06.2017 12.01.2018	ПК: 0,65
WorldView-4 (1 КА), США	11.11.2016	ПК: 0,31
SuperView-1 (16 КА), Китай	28.12.2016 09.01.2018 ...	ПК: 0,50
Cartosat-3 (3 КА), Индия	2018-...	ПК: 0,28
CAS500 (2 КА), Южная Корея	2019-2020	ПК: <0,50
Pléiades-Neo (4 КА), Франция	2020-2021	ПК: 0,30
WorldView-Legion (6 КА), США	2020-2021	ПК: 0,35-0,50
OptiSAR-Optical (8 КА), Канада	2020-...	ПК: 0,50
KOMPSat-7 (1 КА), Южная Корея	2021	ПК: 0,30
WorldView-150 (2 КА), США	2025-2026	ПК: 0,30
РБКА, Россия, Беларусь	2023	ПК: 0,35

ПК – панхроматический канал.

Так, к космическим оптико-электронным системам предъявляются жесткие требования по разрешению, с целью получения высокоинфор-

мативных данных о состоянии исследуемых наземных объектов.

Отсюда вытекает необходимость и актуальность создания методик, позволяющих осуществлять анализ качества цифровых изображений. Использование этих методик позволит повысить достоверность результатов оценок и правильно выбрать технические характеристики оптико-электронных систем.

В диссертационной работе планируется получить новое решение актуальной научно-технической задачи, связанной с оценкой основных показателей информативности ОЭС космической системы ДЗЗ в видимом и ИК-диапазоне спектра.

Целью исследований является повышение уровня достоверности априорных и апостериорных оценок основных показателей информативности ОЭС.

Объектом исследования являются методы повышения параметров информативности опти-

ко-электронной системы высокого разрешения в видимом и инфракрасном диапазоне для задач ДЗЗ из космоса.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- Разработка математической модели оптико-электронного тракта с определением оптимальных исходных параметров системы.
- Проверка адекватности модели с проведением экспериментальных исследований.
- Анализ полученных результатов и сопоставление их с данными лётных испытаний.
- Разработка методов контроля выходных параметров системы.

Реализация поставленных целей и задач исследования планируется в рамках выполнения совместных национальных и межгосударственных НИОКР и научно-технических проектов, планируемых к выполнению в ОАО «Пеленг».

УДК 535.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА В ПРИБОРЕ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Ломако А.А.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

В процессе проектирования оптических систем для авиационных и космических приложений возникает необходимость проведения предварительных модельных расчетов с целью выявления величин возможных деформаций, параметров жесткости и запаса прочности разрабатываемой конструкции.

В данной работе рассматривается вариант трёхточечного крепления на примере плоского зеркала, которое участвует в формировании изображения с помощью объектива с фокусным расстоянием 400 мм и апертурой 90 мм. Зеркало, являясь частью оптической системы, должно удовлетворять высоким требованиям к качеству отражающей поверхности, а система его крепления должна обеспечивать сохранение параметров плоскостности.

Актуальность исследуемого вопроса состоит в том, что для приборов авиационного и космического базирования необходимо совмещать требования жесткости и максимального уменьшения массогабаритных параметров, что является взаимоисключающими категориями. Тем не менее, при решении конкретной практической задачи, возможно найти вариант реализации системы крепления и параметров зеркала так, чтобы одновременно удовлетворить всем требованиям.

Проблеме решения противоречивых требований к конструированию приборов космического и авиационного базирования посвящен учебник [1],

в котором изложены основные аспекты и даются соответствующие рекомендации. В частности, оговариваются способы крепления плоских зеркал, которые для небольших зеркал (до 800 мм) не сильно отличаются от способов крепления зеркал согласно справочнику [2].

Например, основными рекомендациями к параметрам и условиям закрепления плоских зеркал согласно [1, 2] являются:

- $d = (1/8 - 1/10) \cdot l$, где d – толщина зеркала, l – наибольший размер или диаметр;
- СКО формы поверхности от расчетной не более 0.01 мкм;
- Стекло марки К8;
- Условие статической определенности соединения (опора на три точки);
- Эластичность соединения;
- Компенсация воздействий колебаний температуры;
- Возможность регулировки величин замыкающих усилий.

Однако не все эти рекомендации могут быть удовлетворены одновременно. Например, ограничения по массе, а также требование к минимальному размеру большого зеркала могут заставить сократить толщину зеркала и отступить от рекомендации номер один, ограничение по составу используемого материала также может