

необходимо найти изолированные переходы в поглощении, которые зависят главным образом от матричных элементов  $\langle U^{(4)} \rangle$  и  $\langle U^{(6)} \rangle$ . Такими являются переходы с основного уровня  ${}^4I_{9/2}$  на уровни  ${}^2P_{1/2}$  и  ${}^4I_{15/2}$ , сила линии  $S$  которых вычисляется по формулам:

$$S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}) = 0,0367 \cdot \Omega_4, \quad (2, a)$$

$$S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}) = 0,0001 \cdot \Omega_4 + 0,0452 \cdot \Omega_6, \quad (2, б)$$

соответственно. Если пренебречь первым слагаемым во втором уравнении, то параметр оптического качества  $\chi$  может быть найден из следующего соотношения:

$$\chi = 1,23 \cdot S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}) / S({}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}) \quad (2, в)$$

Здесь нет необходимости в определении концентрации ионов неодима в кристалле, что существенно упрощает эксперимент и вычисления. В качестве примера на рисунке 2 показан спектр коэффициентов поглощения кристалла CNdV.

В данном случае необходимо знание только относительных величин сил линий  $S$ , которые пропорциональны интегральным коэффициентам поглощения  $\int \bar{k}(\lambda) d\lambda$  соответствующих переходов усредненным по поляризациям, что приводит к следующему соотношению:

$$\chi = \frac{n_{vis}}{(n_{vis}^2 + 2)^2} \left( \frac{n_{ir}^2 + 2}{n_{ir}} \right)^2 \frac{\bar{\lambda}_{ir}}{\bar{\lambda}_{vis}} \frac{\int \bar{k}_{vis}(\lambda) d\lambda}{\int \bar{k}_{ir}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Здесь  $n$  – показатель преломления,  $\bar{\lambda}$  – средневзвешенная длина волны перехода, а индексы  $vis$  и  $ir$  обозначают входящие в формулу величины на длинах волн, соответствующих переходам  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$  и  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ .

Значения параметра спектроскопического качества  $\chi$  для кристаллов кальциевых ванадатов сведены в таблицу. Как видно, значения параметра  $\chi$  полученные по двум методам находятся в хорошем согласии друг с другом.

Таблица – Значения параметра спектроскопического качества, вычисленного по теории Д-О и формуле (2)

Кристалл	CYV	CNdV	CLaV	CKV	CLV
$\chi$ (Д-О)	1,11	1,27	1,14	1,17	1,25
$\chi$ (Ф-ла (3))	1,10	1,15	1,11	1,15	1,21

УДК 629.7

## СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ

Матвеев В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

**Введение.** Системы стабилизации (СС) обеспечивают требуемую ориентацию оптической оси в пространстве [1–3]. СС наряду со стабилизацией используются и для управления угловым

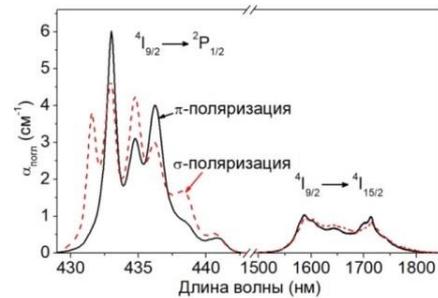


Рисунок 2 – Спектры коэффициентов поглощения  $\alpha_{полз}$  на переходах  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ ,  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  кристалла  $C_9Nd(VO_4)_7$

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние состава кристаллов кальциевых ванадатов на люминесцентные свойства иона неодима. Увеличение параметра  $\chi$  от кристалла  $Nd:Ca_9Y(VO_4)_7$  к кристаллу  $Nd:Ca_{10}Li(VO_4)_7$  указывает на увеличение вероятности перехода  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  и уменьшение вероятностей переходов  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ . Это позволяет сделать вывод, что, изменяя состав кристалла, можно в некоторых пределах варьировать люминесцентные характеристики иона неодима.

### Литература

- Görrler-Walrand C. Spectral intensities of f-f transitions / C. Görrler-Walrand and K. Binnemans // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. – 1998. – Vol. 25. – P. 101–264.
- Многоуровневые функциональные схемы кристаллических лазеров / А.А. Каминский, Б.М. Антипенко. – М.: Наука, 1989. – 270 с.
- Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered  $Ca_9(La/Y)(VO_4)_7$  and  $Ca_{10}(Li/K)(VO_4)_7$  crystals / P.A. Loiko, [et al.] // J. Lumin. – 2013. – Vol. 137. – P. 252–258.
- Crystal structures of double vanadates  $Ca_9R(VO_4)_7$ . III. R = Nd, Sm, Gd or Ce / A.A. Belik [et al.] // Crystallogr. Rep. – 2000. – Vol. 45. – P. 798–803.
- Growth and spectroscopy of new laser crystals  $Ca_{10}Yb_{0.3}K_{0.1}(VO_4)_7$  / М.В. Kosmyna, [et al.] // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19, N 4. – P. 552–554.
- Photoluminescence properties of  $Ca_9Y(VO_4)_7$  and  $Ca_9Y_{0.95}Ln_{0.05}(VO_4)_7$  ( $Ln^{3+} = Eu^{3+}, Sm^{3+}, Pr^{3+}$ ) / S. Chao [et al.] // J. Alloy Compd. – 2009. – Vol. 487. – P. 346–350.
- Spectroscopy of a New Laser Garnet  $Lu_3Sc_2Ga_3O_{12}:Nd^{3+}$  / A.A. Kaminskii [et al.] // Phys. Stat. Sol. A. – 1994. – Vol. 141. – P. 471–494.

положением стабилизированной оптико-электронной аппаратуры, а также для измерения угловых отклонений подвижного объекта. В наиболее распространенных СС в качестве измеритель-

ных устройств используются гироскопы. Возможны СС с применением негироскопических измерительных устройств: акселерометров, оптических устройств и др. Такие СС называют негироскопическими.

В работе анализируется СС на базе двухосного карданова подвеса (рис. 1), управляемого от инерциального измерительного модуля (ИИМ), содержащего МЭМС-гироскопы и МЭМС-акселерометры (МЭМС – микроэлектромеханическая система).

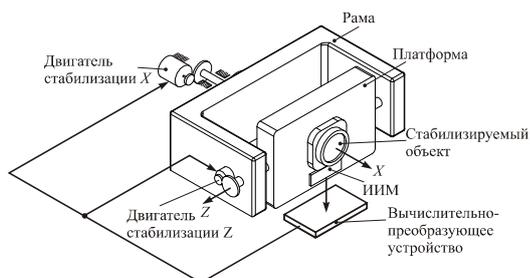


Рисунок 1 – Двухосная система стабилизации

Платформа содержит оптико-электронную аппаратуру и имеет две степени свободы относительно подвижного объекта: вращение вместе с рамой вокруг оси  $X$  и собственное вращение относительно оси  $Z$ . Сигналы МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров поступают в вычислительно-преобразующее устройство, которое формирует сигналы для стабилизации платформы (оптической оси) при ее отклонении от заданного направления.

#### Способы стабилизации оптической оси.

В зависимости от состава сенсоров ИИМ возможны различные способы стабилизации платформы: а) по сигналам МЭМС-гироскопов; б) по сигналам МЭМС-акселерометров; в) посредством совместной обработки сигналов МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров.

При стабилизации оптической оси только по сигналам МЭМС-гироскопов следует учитывать тот факт, что последние являются датчиками угловой скорости. Следовательно, СС будет обладать достаточно высоким быстродействием, но постоянное возмущающее воздействие отрабатывать не будет. Кроме того, шум, содержащийся в выходных сигналах МЭМС-гироскопов, приводит к накоплению среднеквадратического отклонения (СКО) угла стабилизации пропорционально квадратному корню из времени [4]. При этом такая СС будет не избирательна к плоскости горизонта или какому-либо другому направлению, если конечно для управления платформой не используются сигналы оптической системы.

Принципиально для стабилизации платформы можно использовать сигналы МЭМС-акселерометров, посредством которых определяются углы отклонения оптической оси относительно

плоскости горизонта, подаваемые затем на двигателя стабилизации. В этом случае шум МЭМС-акселерометров не вызовет накопления СКО погрешности стабилизации. Кроме того, СС приобретет свойства избирательности к плоскости горизонта. Однако ускоренное движение объекта приведет к тому, что в конечном счете платформа займет положение кажущейся вертикали. Например, при движении объекта горизонтально с ускорением  $0,1 \text{ g}$  погрешность стабилизации составит  $0,57^\circ$ .

Таким образом, использование только гироскопов или акселерометров не позволит создать СС, обладающую всем требованиям точности и помехозащищенности. В связи с этим целесообразным является совместное использование сигналов МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров.

**Стабилизация МЭМС-гироскопами и МЭМС-акселерометрами.** Структурная схема СС по каналу рамы, реализованная при совместной обработке сигналов гироскопов и акселерометров приведена на рис. 2.

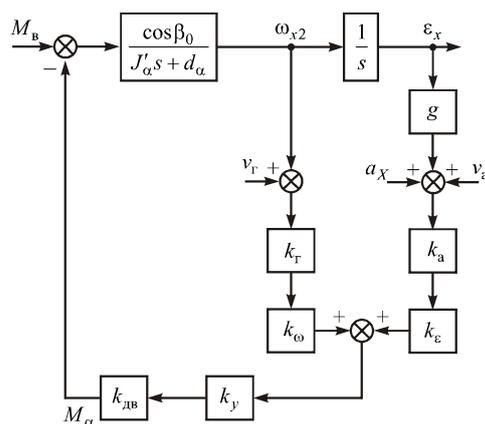


Рисунок 2 – Структурная схема канала рамы системы стабилизации на МЭМС-гироскопах и МЭМС-акселерометрах

На платформу с передаточной функцией

$$W(s) = \cos \beta_0 / (J'_\alpha s + d_\alpha),$$

где  $J'_\alpha$  – приведенный момент инерции платформы,  $d_\alpha$  – коэффициент скоростного трения,  $\beta_0$  – угол поворота платформы относительно рамы, действует возмущающий момент  $M_b$ . Последний приводит к возникновению угловой скорости платформы  $\omega_{x2}$ , которую измеряет МЭМС-гироскоп с инструментальной погрешностью  $v_r$  и коэффициентом передачи  $k_r$ . Угол отклонения платформы относительно плоскости горизонта измеряет МЭМС-акселерометр, выходной сигнал которого приближенно может быть представлен так:

$$A \approx k_a(g\varepsilon_x + v_a),$$

где  $k_a, v_a$  – коэффициент передачи и инструментальная погрешность акселерометра соответственно.

Сигналы МЭМС-гироскопа и МЭМС-акселерометра масштабируются коэффициентами  $k_\omega, k_\varepsilon$  и затем складываются, образуя тем самым закон управления платформой по углу и угловой скорости.

Далее сигнал управления усиливается и подается на двигатель стабилизации с коэффициентами передачи  $k_y$  и  $k_{дв}$  соответственно. Здесь двигатель принят безынерционным звеном, так как в СС он практически функционирует в заторможенном состоянии.

Реакция СС на ускорение объекта может быть приближенно описана аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W_a^\varepsilon(s) \approx -g^{-1}/(Ts+1),$$

где

$$T = k_T k_\omega / (g k_a k_\varepsilon) - \quad (1)$$

постоянная времени.

Из анализа постоянной времени (1) можно заключить, что с увеличением коэффициента передачи по угловой скорости  $k_\omega$  будет увеличиваться время переходного процесса движения платформы к положению кажущейся вертикали. Таким образом, увеличение постоянной времени  $T$  в данной СС можно уподобить увеличению периода колебаний классической гироскопической вертикали, что в конечном счете снижает возмущения платформы ускорениями объекта. По этой причине в классических гировертикалях период собственных колебаний увеличивают, стремясь в идеале достичь периода Шулера (84,4 мин), когда система становится инвариантной к ускорениям объекта.

Следует отметить, что в рассматриваемой СС увеличение коэффициента передачи по углу  $k_\varepsilon$  будет уменьшать постоянную времени и, следовательно, увеличивать возмущенность платформы ускорениями объекта. Время переходного процесса движения платформы к положению кажущейся вертикали СС можно оценить по приближенному соотношению:

$$t_{пер} \approx 3T.$$

Если помимо ускорения объекта, на платформу действует постоянный возмущающий момент  $M_0$ , например, от моментов сил трения или несбалансированности подвеса, то это приведет к возникновению статической погрешности, которая в установившемся режиме будет определяться соотношением:

$$\varepsilon_{уст} = M_0 / (k_{дв} k_y k_a k_\varepsilon g). \quad (2)$$

Из анализа (2) следует, что с увеличением коэффициента передачи по углу  $k_\varepsilon$  происходит снижение погрешности стабилизации, что противоречит требованию уменьшения подверженности СС ускорениями объекта.

Если погрешности МЭМС-гироскопа и МЭМС-акселерометра представить моделями белого шума со спектральными плотностями  $ARW^2$  ( $ARW$  – angle random walk – случайное блуждание угла, [рад/ $\sqrt{с}$ ]) и  $VRW^2$  ( $VRW$  – velocity random walk – случайное блуждание скорости, [м/с/ $\sqrt{с}$ ]), то среднеквадратические отклонения погрешности стабилизации платформы будут определяться приближенными равенствами:

$$\sigma^{ARW}_\varepsilon \approx ARW (T/2)^{0.5}, \quad (3)$$

$$\sigma^{VRW}_\varepsilon \approx VRW/g/(2T)^{0.5}, \quad (4)$$

где постоянная времени  $T$  определяется (1).

Соотношения (3), (4) позволяют оценить вклад шума МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров в погрешность стабилизации СС. Соответственно, с увеличением постоянной времени  $T$  влияние шума МЭМС-гироскопа будет возрастать, а шума МЭМС-акселерометра будет снижаться.

Таким образом, имеют место противоречивые требования: с одной стороны необходимо увеличивать постоянную времени  $T$  для снижения влияния шума акселерометров и ускоренного движения объекта, с другой стороны необходимо уменьшать постоянную времени, чтобы снижать влияние шума гироскопа и возмущающего момента  $M_0$ . Следовательно, синтез СС с управлением по сигналам МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров – это компромисс между влиянием возмущений платформы и степенью ослабления шумов датчиков.

#### Литература

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.
2. Матвеев В.В., Кисловский Е.Ю., Мильченко Д.Н., Распопов В.Я., Телухин С.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах. Мехатроника, автоматизация, управление. 2019, № 7. – С. 437–442.
3. Matveev V.V., Raspopov V.Y. MEMS-based devices and systems for orientation, stabilization and navigation / 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017 – Proceedings. 24. 2017.
4. Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 9–2. – С. 251–267.