УДК 621.373:521.933

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

В. А. Крайнов, В. Е. Жаров

(ГАИШ)

Приводится описание генератора, управляемого напряжением — одного из важных узлов лазерного гироскопа, создаваемого для изучения неравномерности вращения Земли. Известные схемы высокочастотных генераторов не позволяют измерять малые вариации угловой скорости вращения. В основу разработанного и изготовленного прибора положен принцип синтеза частоты: генерация низкочастотного сигнала и смешивание его с эталонным высокочастотным сигналом.

Принцип действия лазерных гироскопов основан на эффекте Саньяка, обнаружившего, что оптические пути лучей, распространяющихся в противоположных направлениях во вращающемся кольцевом резонаторе, различны.

Хорошо известно (см., напр., [1]), что большей чувствительностью обладают гироскопы, в которых измеряется не оптическая разность путей, для нашего конкретного случая много меньшая длины волны лазера, а разность фаз или частот лучей. В работе [2] предложено использовать гироскоп с пассивным кольцевым резонатором, в котором измеряется разность частот лучей. Такой прибор обладает рядом преимуществ по сравнению с гироскопами, в которых измеряется разность фаз, а также с активными кольцевыми гироскопами [1, 3].

Для измерения угловой скорости Земли выбрана схема, предложенная в [2]. Настройка резонатора на вершину резонансной кривой для луча, распространяющегося по часовой стрелке, осуществляется смещением сферического зеркала, установленного на пьезокерамическом столбике (рис. 1) [4]. При этом исключаются микросейсмические и температурные воздействия на резонатор. Для луча, обегающего резонатор против часовой стрелки, настройка на вершину резонансной кривой реализуется путем изменения частоты лазерного луча с помощью акустооптического модулятора (АОМ). Частота изменяется генератором, управляемым напряжением (ГУН). К генератору предъявляются высокие требования, так как именно измерения частоты ГУН позволяют определить угловую скорость вращения Земли Ω. Измерение частоты может быть легко выполнено при помощи цифрового частотомера [5]. Это является дополнительным аргументом в пользу выбранной нами схемы гироскопа (рис. 1).

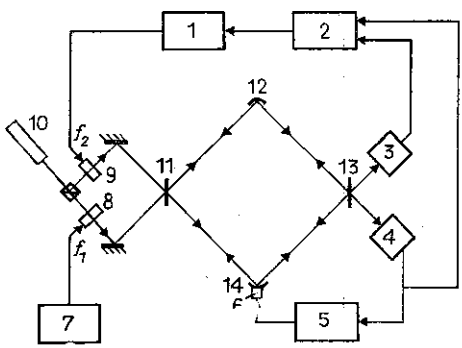

Рис. 1. Блок-схема лазерного гироскопа: *1* — ГУН; *2* — дифференциальный усилитель; *3*, *4* — фотодетекторы; *5* — устройство подстройки длины резонатора; *6* — пьезокерамические столбики; *7* — стандарт частоты; *8*, *9* — акустооптические модуляторы; *10* — гелий-неоновый лазер ЛГН-303; *11*, *13* — плоские полупрозрачные зеркала; *12*, *14* — сферические зеркала

В гироскопе использованы два АОМ, изготовленных из кристаллов двуокиси теллура. Для эффективной работы данных АОМ требуется невысокая мощность акустической волны (~0,5 Вт), что не приводит к нагреву кристалла модулятора. Рабочая частота модуляторов равна 25 МГц. При этом на первый модулятор со стандарта частоты подается фиксированная частота f_1=25 МГц, а на второй АОМ — частота f_2, снимаемая с ГУН. Разность Δf этих частот пропорциональна угловой скорости вращения Земли Ω:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda P}\Omega \sin\varphi,$$

где A — площадь, P — периметр резонатора, λ — длина волны лазера, φ — широта, равная 55°42′. Для нашего гироскопа с квадратным резонатором со стороной 3,10 м $\Delta f \approx 295{,}1$ Гц. Настройка ГУН на частоту f_2 осуществляется путем его включения в петлю обратной связи (рис. 1). Следовательно, частота ГУН при отсутствии управляющего напряжения должна быть f_2=25,0002951 МГц. Сезонная неравномерность вращения Земли приводит к изменению частоты Δf всего лишь на 10^{-5} Гц. Известно, что изготовить даже кварцевый ГУН со стабильностью выше 10^{-6} достаточно сложно. Флуктуации f_2, а следовательно, и Δf, вызванные нестабильностью частоты такого генератора, составят до нескольких десятков герц и при работающей петле обратной связи [2]. Поэтому такой генератор не позволит заметить изменение угловой скорости вращения Земли даже при большом времени накопления. Для уменьшения флуктуаций частоты f_2, а следовательно, для повышения точности определения Ω был разработан и изготовлен специальный синтезатор частоты, выполняющий функции прецизионного высокочастотного ГУН, и поэтому называемый нами ГУН.

Было решено формировать частоту, равную Δf, и смешивать ее со стабильной частотой f_1. После выделения частоты f_2 из суммарного сигнала она подается на второй АОМ. Функциональная схема ГУН показана на рис. 2. Управляющее напряжение U подается на генератор, который вырабатывает меандр с частотой F=18 886 Гц. Именно эта частота измеряется в процессе накопления сигнала. Изменение управляющего напряжения на ±12 В приводит к изменению частоты на ±10 Гц. Такая величина вариации частоты взята потому, что, во-первых, размеры резонатора известны с ошибкой ±2—3 мм и, во-вторых, широта, на которой расположен гироскоп, не известна с достаточной

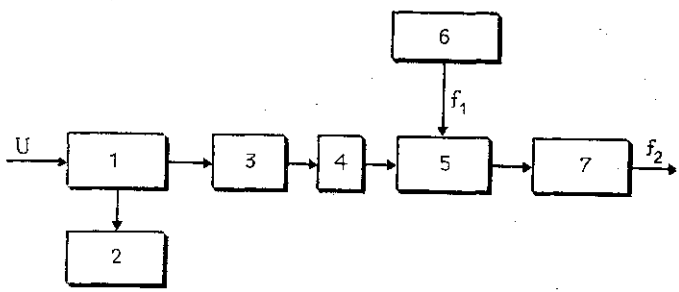

Рис. 2. Функциональная схема ГУН: *1* — генератор частоты F=18 886 Гц; *2* — частотомер; *3* — делитель частоты (F/64); *4* — ФНЧ; *5* — смеситель; *6* — стандарт частоты; *7* — усилитель мощности

точностью. Генератор выполнен на прецизионном операционном усилителе К140УД17 и микросхеме КР1108ПП1 [6]. Использование прецизионных резисторов и конденсаторов с низким температурным коэффициентом емкости позволило достичь стабильности частоты $\sim 3 \cdot 10^{-5}$. Выбор частоты 18 886 Гц обусловлен параметрами используемых конденсаторов. Частота 18 886 Гц делится на 64 и подается на фильтр низкой частоты (ФНЧ) второго порядка с частотой среза 300 Гц. На выходе ФНЧ выделяется синусоидальный сигнал с частотой $\Delta f = 295{,}1$ Гц, который подается на смеситель. На второй вход смесителя подается вырабатываемый стандартом частоты сигнал $f_1 = 25$ МГц со стабильностью не хуже $2 \cdot 10^{-11}$. На выходе смесителя наряду с сигналом с частотой f_2 присутствует комбинационная помеха с частотой 24,9997049 МГц, отделить которую от полезного сигнала путем фильтрации практически невозможно. Поэтому был применен метод фазового подавления комбинационной составляющей [7]. Смеситель выполнен на двух аналоговых перемножителях К174ПС1, причем подаваемые на один из них сигналы с частотами 25 МГц и 295,1 Гц сдвинуты по фазе на 90° относительно подаваемых на другой (рис. 3). Выходные сигналы с перемножителей вычитаются на дифференциальном каскаде К175УВ2. При этом осуществляется подавление комбинационной помехи по мощности в ~ 100 раз. Усиленный по мощности сигнал f_2 подается на второй АОМ.

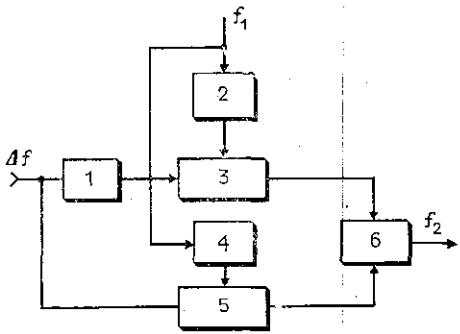

Рис. 3. Функциональная схема смесителя: *1* — фазовращатель сигнала с частотой Δf на +90°; *2*, *4* — фазовращатели сигнала с частотой f_1 на +45° и —45° соответственно; *3*, *5* — перемножители сигналов; *6* — вычитающий усилитель

Созданный ГУН с частотой 25,0002951 МГц имеет стабильность частоты 10^{-9}. Более точное измерение частоты работающего в петле обратной связи генератора позволит заменить микросхему КР1108ПП1 кварцевым ГУН с более высокой стабильностью. Поэтому достижение стабильности частоты Δf порядка 10^{-6} представляется вполне реальным. При этом стабильность f_2 превысит 10^{-10}. Это может оказаться полезным при небольших временах накопления в случае применения более мощного лазера [3] для изучения короткопериодных вариаций вращения Земли.

Авторы благодарны Д. П. Скулачеву (ИКИ РАН) за обсуждение работы и полезные советы при разработке прибора. Работа выполнена по гранту А-02-027 (ESO) Южной Европейской обсерватории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chow W. W. et al.//Rev. Mod. Phys. 1985. **57**. P. 61.
2. Ezekiel S., Balsamo S. R.//Appl. Phys. Lett. 1977. **30**, N 9. P. 478.
3. Жаров В. Е., Крайнов В. А., Маркова С. Н., Сажин М. В.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 3. С. 81.
4. Крайнов В. А., Жаров В. Е.//Там же. 1995. № 2. С. 103.
5. Серегин В. В., Кукулиев Р. М. Лазерные гирометры и их применение. М., 1990.

6. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник. М., 1989. С. 97.
7. Радиоприемные устройства/Под ред. Л .Г. Барулина. М., 1984. С. 152—159.

Поступила в редакцию
14.06.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 2

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 548.74

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ СПЛАВОВ Pr—Fe

А. С. Илюшин, Н. А. Хатанова, Е. А. Рыкова

(кафедра физики твердого тела)

Методом дифракции электронов на порошках установлено, что в сплаве Pr — 77 ат.% Fe после отжига в течение 10 ч при 800°С образуются два интерметаллида: Pr_2Fe_{17} и $PrFe_2$ в двух модификациях фаз Лавеса — *C*14 и *C*15. Показано, что структура $PrFe_2$ *C*14 в крупинках порошка неустойчива по отношению к электронному облучению в колонне электронного микроскопа, в результате которого происходит радиационно-стимулированный фазовый переход интерметаллида $PrFe_2$ *C*14 с гексагональной решеткой в ГЦК структуру с пр. гр. *Fm*3*m* и параметром *a*=9,1 Å.

Идентификация фаз в многофазных сплавах Pr—Fe методом рентгеновского анализа затруднена тем, что значения многих межплоскостных расстояний *d* для α-Pr, редкоземельных интерметаллических соединений Pr_2Fe_{17} и $PrFe_2$ (в двух модификациях фаз Лавеса: *C*14 типа $MgZn_2$ и *C*15 типа $MgCu_2$) близки или совпадают и большинство отражений имеет слабую интенсивность. Поэтому целесообразно использовать метод дифракции электронов, позволяющий благодаря локальности пучка получать точечные дифракционные картины от каждой из фаз в отдельности, даже если какая-либо из них представлена в небольшом количестве.

В работе [1] нами было показано, что ниже эвтектической температуры после отжига в течение 500 ч при 600°С сплав Pr — 77 ат.% Fe состоит из двух фаз: α-Pr + Pr_2Fe_{17}. Цель настоящей работы состояла в определении структурного состояния этого же сплава выше эвтектической температуры после 10-часового отжига при 800°С.

Сплав Pr — 67 ат.% Fe был получен в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном поду в атмосфере аргона. Для приготовления сплава использовались карбонильное железо и очищенный методом вакуумной дистилляции празеодим. Отжиг проводился в откачанных до высокого вакуума и запаянных кварцевых ампулах. Электронограммы были получены в электронном микроскопе «Tesla» BS-613 при ускоряющем напряжении 80 кВ. В качестве объектов для электронной дифракции использовались не традиционные образцы в виде тонких фольг, а порошок сплава, помещенный на медную опорную сетку. Этот выбор объекта был вынужденным, так как сплавы на основе празеодима легко окисляются при электролитической полировке и промывке от любого соприкосновения с водосодержащей жидкостью. Размер крупинок порошка был 1—5 мкм.

Специфика объектов для электронной дифракции позволила выявить некоторые особенности структурных состояний после электронного облучения в электронном микроскопе: на изображениях крупинок