

Полученные экспериментальные результаты позволяют осуществлять предварительный отбор быстродействующих фотоприемников по виду вольт-амперной характеристики.

В симметричных структурах металл—полупроводник—металлы с потенциальными барьерами у контактов наиболее быстрая дрейфовая составляющая фототока связана с движением носителей в области пространственного заряда, размер которой зависит от уровня легирования полупроводника и приложенного напряжения. В остальной части канала вклад в фототок вносит более медленная диффузионная составляющая. Условия, близкие к оптимальным, реализуются в том случае, когда область пространственного заряда занимает все межэлектродное пространство. В исследованных фотоприемных элементах с шириной фотопроводящего канала  $\sim 30$  мкм условия прохождения носителей не являются идеальными (нетрудно убедиться, что при уровне легирования  $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$  и напряжении  $U_{см} = 90$  В размер обедненной области составляет  $\sim 12$  мкм). Можно надеяться поэтому, что простое уменьшение межэлектродного расстояния до 1—10 мкм повысит быстродействие приемников этого типа.

Таким образом, проведенные исследования фотоэлектрических свойств и динамических характеристик полупроводниковых фотоприемников с конструкцией фоторезистора показали, что наличие потенциальных барьеров в области контактов позволяет существенно повысить их быстродействие.

### Список литературы

- [1] *Королюков В. И.* // Фотоприемники и фотопреобразователи / Под ред. Ж. И. Алферова и Ю. В. Шмарцева. Л.: Наука, 1986. С. 6—36.
- [2] *Forrest S. P.* // IEEE Spectrum. 1986. Vol. 23. N 5. P. 76—84.
- [3] *Свечников Г. С.* // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1986. № 10. С. 11—26.
- [4] *Лукьянов В. Н., Печиталенико В. Ф., Прокофьева С. П. и др.* // Тез. докл. XII Всесоюз. научно-технической конф. «Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстротекущих процессов». М., 1985. С. 188.
- [5] *Зи С.* Физика полупроводников. М.: Мир, 1984. Т. 1. С. 455.

Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений  
Москва

Поступило в Редакцию  
6 февраля 1989 г.

## ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕЛЬНОВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА НА ВОЛНУ 0,85 МКМ

*И. А. Андропова, Д. Д. Гусовский, В. М. Геликонов,  
В. И. Леонов, Ю. А. Мамаев, А. А. Туркин, А. С. Язнов*

В последние годы достаточно много внимания уделяется исследованию волоконно-оптических кольцевых интерферометров в качестве датчиков угловой скорости вращения [1]. Предложены различные оптико-физические схемы таких интерферометров и проведено детальное исследование целого ряда физических факторов, влияющих на чувствительность и дрейф нуля оптического гироскопа. При этом показано, что наиболее перспективными с точки зрения получения высокой чувствительности являются цельноволоконные кольцевые интерферометры [2—3], обладающие достаточно стабильными во времени выходными характеристиками. Флуктуационные явления, определяющие предельную чувствительность, на наш взгляд, исследованы в литературе недостаточно полно.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования цельноволоконного интерферометра Саныяка на основе одномодового изотропного волокна, собранного по схеме, впервые предложенной в [2] и показанной на рис. 1. Целью работы было исследование результирующих флуктуационных характеристик интерферометра, а также выявление и изучение источников флуктуаций, которые можно было проводить на фоне медленного дрейфа, связанного с использованием изотропного волокна.

Макет содержал 500 м цилиндрического волокна, намотанного на катушку диаметром 18 см. Источником излучения служил одномодовый многочастотный полупроводниковый лазер марки ИЛПН-204, работающий на волне 0.85 мкм. Ввод света в волокно производился жестировкой торца волокна в фокальной плоскости линзовой системы на выходе лазера. Коэффициент ввода составлял 15 %. В качестве волоконных делителей использовались полированные делители с твердеющей иммерсией с потерями менее 0.3 дБ, обладающие высокой долговременной стабильностью. Волоконный поляризатор был выполнен на основе половинки делителя (с остаточным слоем оболочки волокна менее 0.1 мкм), на которую наносились диэлектрический буферный слой определенной толщины и «глухая» пленка алюминия. Коэффициент экстинкции поляризатора был не хуже 50 дБ при потерях менее 0.3 дБ. Фазовым модулятором служил отрезок волокна длиной  $\sim 2.5$  м, намотанный на пьезоцилиндр диаметром 30 мм (всего 25 витков). Все элементы (делители и поляризатор) соединялись с помощью сварки с потерями в каждом стыке, не превышающими 0.3 дБ. Для оптими-

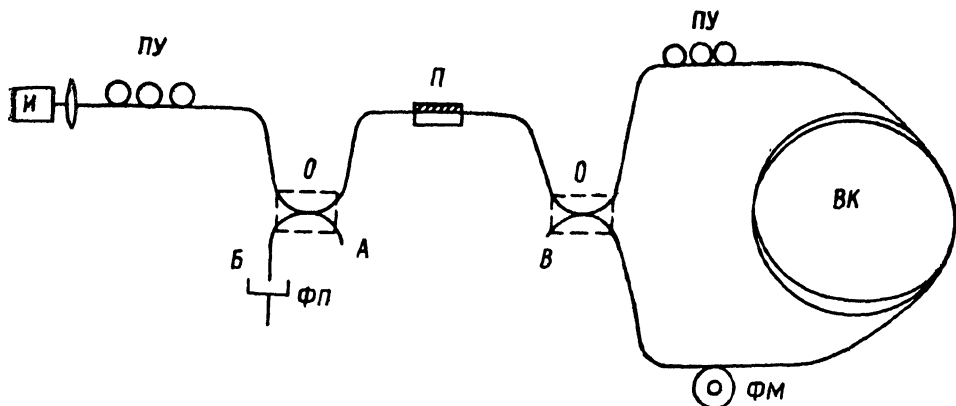


Рис. 1. Схема цельноволокноного гироскопа.

И — источник, О — ответвитель, П — поляризатор, ПУ — поляризационный управитель, ФМ — фазовый модулятор, ФП — фотоприемник, ВК — волоконная катушка.

зации выходного сигнала и устранения возможного его попадания в схему интерферометра были введены два волоконных поляризационных управителя [2, 10].

Теоретический анализ флуктуационных характеристик волоконно-оптических интерферометров проведен в работах [11, 12], в которых показано, что чувствительность интерферометра определяется избыточными (наддробовыми) флуктуациями интенсивности источников излучения, запитывающих интерферометр. Исходя из полученных результатов, выражение для порогового сигнала вращения  $\Omega_{пор}$  кольцевого волоконного интерферометра может быть представлено в виде

$$\Omega_{пор} = \frac{\lambda c \sqrt{\frac{e}{I} (1 + \xi^2) \Delta F}}{2\pi D L J_1 \left( 2\Phi \sin \frac{\Omega_0 \tau}{2} \right)},$$

где  $\Phi$  и  $\Omega_0$  — глубина и частота фазовой модуляции соответственно,  $J_1(x)$  — функция Бесселя первого рода,  $L$  — длина волокна,  $\tau$  — время распространения света в волокне,  $D$  — диаметр волоконной катушки,  $\lambda$  — длина волны в вакууме,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона,  $I$  — фототок,  $\Delta F$  — полоса регистрирующей аппаратуры,  $\xi^2 = \frac{M_{ш}^2}{M_{др}^2}$  — отношение спектральной плотности шума сигнала к дробовому.

Влияние избыточных флуктуаций интенсивности на пороговую чувствительность имеет место и в двухлучевых интерферометрах (Маха—Цендера, Майкельсона), для которых рассмотрены и реализованы методы компенсации флуктуаций за счет использования двух интерференционных каналов [12, 13]. Использование второго канала для компенсации шума в кольцевом интерферометре весьма привлекательно, так как позволит компенсировать не только флуктуации, но и дрейф. Эти вопросы, насколько нам известно, в литературе не рассматривались, что связано, по-видимому, с необходимостью размещения в этом канале дополнительного поляризатора, а также с возможной нестабильностью разности фаз делителя. Вопросы компенсации шумов кольцевого интерферометра за счет использования дополни-

тельного лазерного выхода теоретически рассматривались в работе [14], но экспериментальные исследования не проведены. В кольцевых интерферометрах принципиальная пороговая чувствительность определяется дробовыми шумами, но для ее достижения надо найти пути исключения избыточных шумов. Несмотря на большое число экспериментальных работ, в которых приводятся записи шумов сигнала на ленте самописца, нет прямого сравнения с дробовыми шумами. Дробовой предел сам по себе ничего не говорит о предельной чувствительности, поскольку его величина зависит от мощности оптического сигнала, т. е. от фототока. Задача повышения предельной чувствительности сводится, таким образом, к задаче достижения дробового предела при возможно большей мощности на выходе.

Перейдем к описанию эксперимента. Контроль мощности излучения в кольцевом интерферометре осуществлялся тремя фотоприемниками, установленными на выходах *A*, *B*, *B* (рис. 1). С выхода *A* проводился контроль мощности полупроводникового лазера. С выходов *B* и *B* измерялись фототоки сигналов интерференции, которые были близки к противофазным, что подтверждалось уменьшением постоянной составляющей фототока на рабочем выходе при подаче фазовой модуляции и увеличением постоянной составляющей фототока

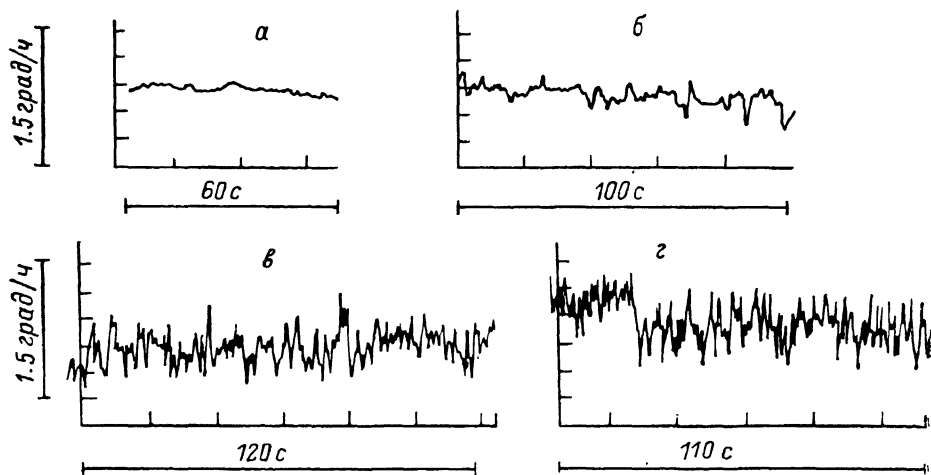


Рис. 2.

с выхода *B*. Модуляция фазы в макете могла проводиться на частоте 34 кГц и в диапазоне 200—240 кГц. Рабочей была выбрана область частот вблизи 220 кГц (что соответствует известному условию  $\Omega_0 \tau \approx \pi$ ) с целью уменьшения влияния на сигнал интерферометра амплитудной модуляции фазового модулятора и обратной реакции на источник (последнее для слабокогерентных источников несущественно).

Для регистрации сигнала на выходе интерферометра были построены селективные усилители на частоты 34 и 220 кГц; в последнем могла осуществляться перестройка от 200 до 240 кГц. Сигнал с выхода селективного усилителя подавался на синхронный детектор, а затем на усилитель постоянного тока И-37 и самописец Н-391; полоса регистрирующей аппаратуры была 1 Гц. Интерферометр размещался на вращающемся столе, который имел электропривод. Калибровочное вращение составляло 75 град/ч. Построенная аппаратура позволяла наблюдать вклад дробовых шумов фототока, начиная с 0.2 мкА. На рис. 2, *a* приведен образец записи шумового сигнала измерительного тракта при нулевом фототоке. Запись на рис. 2, *б* соответствует сигналу, получаемому при освещении фотоприемника тепловым источником (лампой накаливания). Отличие сигналов обусловлено дробовым эффектом. На рис. 2, *в* приведен образец записи сигнала с выхода интерферометра в отсутствие фазовой модуляции (фототоки, соответствующие рис. 2б, *в*, одинаковы и составляли  $\sim 3$  мкА). На рис. 2, *г* дана запись шумового сигнала в рабочем режиме, т. е. при замкнутой цепи фазового модулятора. Совокупность этих записей позволяет идентифицировать вклад шумов электронной аппаратуры, дробовых шумов фототока, избыточных шумов лазера. Измерения проводились на частотах 34, 200, 220 и 225 кГц. Зависимость от частоты несущественная; отличие шумов лазера от дробового говорит о наличии избыточных флуктуаций источника: величина  $\xi \approx 2.4$ . Несущественная зависимость от частоты величины  $\xi$  позволяет предположить, что флуктуации не связаны с фликкерным эффектом. Шумы сигнала отличались от шумов лазера незначительно.

Таким образом, можно сделать вывод, что предельная чувствительность в данном случае определялась главным образом шумами источника излучения. Окончательный вызод можно сделать лишь при установлении корреляции флуктуаций сигнала и источника.

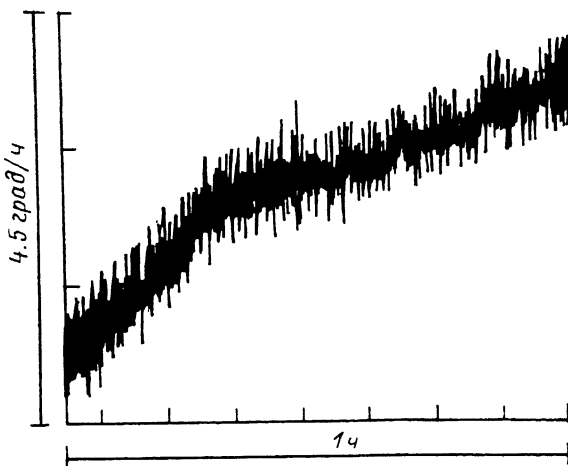


Рис. 3.

Для наблюдения корреляции надо учитывать запаздывание флуктуации сигнала при распространении его по волокну по отношению к компенсирующему сигналу. Численные оценки порогового сигнала, определяемые дисперсией  $\sigma$ , вычисленной по записи шума из условия [15]  $\Omega_{\text{пор}} = \sqrt{\sigma^2} \approx x_{\text{max}}/6$  (где  $x_{\text{max}}$  — максимальный размах шума), при полосе анализа 1 Гц дают значение 0.08—0.12 град/ч. Величину дрейфа, составляющую в нашем случае  $\sim 5$  град/ч, иллюстрирует запись шума (рис. 3), проведенная в течение часа.

#### Список литературы

- [1] Bergh R. A., Lefevre H. C., Shaw H. J. // J. Lightwave Technol. 1984. Vol. LT-2. N 2. P. 91—98.
- [2] Bergh R. A., Lefevre H. C., Shaw H. J. // Opt. Lett. 1981. Vol. 6. N 10. P. 502—504.
- [3] Okamoto K., Takada K., Kawachi M., Noda J. // Electron. Lett. 1984. Vol. 20. N 10. P. 429—430.
- [4] Kim B. Y., Shaw H. J. // Opt. Lett. 1984. Vol. 9. N 8. P. 378—380.
- [5] Алексеев Э. И., Базаров Е. И., Горбушин А. Л. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 10. С. 2059—2060.
- [6] Burns W. K., Moeller R. P., Villaruel C. A., Abebe M. // Opt. Lett. 1984. Vol. 9. N 12. P. 570—572.
- [7] Dianov E. M., Karasik A. Ya., Kozlov V. A. et al. // Proc. III Intern. Conf. on Opt. Fiber Sensors. San Diego, 1985. P. 120.
- [8] Ohtsuka Y., Imai Y. // Appl. Optics. 1985. Vol. 24. N 23. P. 4199—4205.
- [9] Tai S., Kojima K., Noda S. et al. // Electron. Lett. 1986. Vol. 22. N 10. P. 546—547.
- [10] Lefevre H. C. // Electron. Lett. 1980. Vol. 16. N 20. P. 778—780.
- [11] Берштейн И. Л., Зайцев Ю. И., Крацов Ю. А. и др. // Квантовая электрон. 1982. Т. 9. № 5. С. 973—978.
- [12] Алексеев Э. И., Базаров Е. И., Израельян В. Г., Кушта А. В. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 192—194.
- [13] Abbas G. L., Chan V. W. S., Yee T. K. // Opt. Lett. 1983. Vol. 8. N 8. P. 419—421.
- [14] Böhm K., Petermann K., Weidel E. // Opt. Lett. 1982. Vol. 7. N 4. P. 180—182.
- [15] Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970.

Институт прикладной физики АН СССР  
Горький

Поступило в Редакцию  
6 февраля 1989 г.