

**К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев, В.В. Криштоп**

Пермская научно-производственная приборостроительная компания,  
Пермь, Российская Федерация  
Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Российская Федерация

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА НА $\text{LiNbO}_3$**

Проведены измерения полувонового напряжения интегрально-оптического фазового модулятора на  $\text{LiNbO}_3$  в диапазоне температур от  $-40$  до  $+60$  °С. Измерения проводились двумя методиками с применением интерферометра Саньяка и Маха–Цандера. Температурные коэффициенты изменения полувонового напряжения, полученные в экспериментах, согласуются с теоретическими.

**Ключевые слова:** интегрально-оптический модулятор, ниобат лития, схема интегрально-оптическая многофункциональная, фазовый модулятор, полувоновое напряжение.

### **Введение**

Фазовые модуляторы сейчас находят большое применение в сфере телекоммуникаций, квантовых коммуникаций и т.д., особое место занимают фазовые модуляторы СИОМ (схемы интегрально-оптические многофункциональные), используемые при разработке и производстве волоконно-оптических датчиков, таких как волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) или резонаторные волоконно-оптические гироскопы (РВОГ) [1–3]. Величина полувонового напряжения в таких модуляторах является важным параметром, поскольку определяет величину фазового смещения оптического сигнала при подаче напряжения на модулятор [4]. В ВОГ положение рабочей точки определяет чувствительность будущего изделия и изменение полувонового напряжения смещает рабочую точку, что может отражаться на итоговых параметрах ВОГ [5].

Последние годы много исследований посвящено разработке и исследованию резонаторных волоконно-оптических гироскопов (РВОГ), и на данный момент разработано множество схем РВОГ. Многие из разработанных схем работают на высококогерентном

излучении и включают в себя интегрально-оптические фазовые модуляторы [6–8]. Недавно представлены РВОГ, работающие на широкополосном излучении с применением фазовой модуляции [9–11]. Для корректной работы обоих видов схем необходима стабильная работа фазового модулятора во всем температурном диапазоне.

Измерение полуволнового напряжения фазовых модуляторов является важным этапом при проектировании оптических устройств. Методы измерения зависят от конкретного типа модулятора и требуемой точности. Для наиболее точного определения применяются такие устройства, как фазометры, векторные анализаторы или анализаторы спектра. Часто бывает, что выбор метода ограничен доступным оборудованием. В данной статье рассмотрены простые методы измерения полуволнового напряжения при разных температурах с применением источников излучения разной степени когерентности, генератора электрических сигналов, фотоприёмного модуля и осциллографа.

В данной работе проводится измерение величины полуволнового напряжения СИОМ на ниобате лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) в диапазоне температур от  $-40$  до  $+60$  °С двумя методиками.

## **1. Объект исследования**

СИОМ представляет собой интегрально-оптическую схему, состоящую из системы канальных оптических волноводов и параллельной им системы электродов (рис. 1). Топология СИОМ представляет собой симметричный  $Y$ -разветвитель для деления входной оптической мощности в равных пропорциях (50/50). Около волноводов, образующих  $Y$ -разветвитель, напыляют электроды. Поскольку ниобат лития, из которого изготовлен СИОМ, является электрооптическим материалом, показатель преломления которого является функцией приложенного к ним электрического поля, то при подаче напряжения на электроды происходит изменение показателя преломления в волноводах [12]. Выходное излучение из-за различия показателей преломления в плечах  $Y$ -делителя приобретает разность фаз.

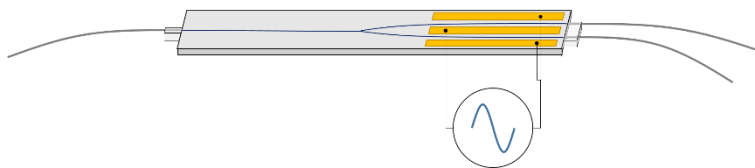


Рис. 1. Топология СИОМ

Для  $\text{LiNbO}_3$  изменение показателя преломления  $\Delta n$  линейно пропорционально приложенному электрическому полю  $E$ :

$$\Delta n = \alpha_{EO} E, \quad (1)$$

где  $\alpha_{EO}$  – линейный электрооптический коэффициент волновода, определяемый материалом.

Важным параметром модулятора является полуволновое напряжение  $V_\pi$  [12], которое определяется как напряжение, необходимое для изменения фазы оптического сигнала на  $\pi$ .  $V_\pi$  можно найти как

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{2\alpha_{EO} L}, \quad (2)$$

где  $L$  и  $d$  – длина электродов и расстояние между электродами соответственно,  $\lambda$  – длина волны оптического излучения.

Электрооптический коэффициент волновода, в свою очередь, можно определить, как

$$\alpha_{EO} \approx -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33}, \quad (3)$$

где  $n_e$  – показатель преломления ниобата лития для необыкновенного луча,  $r_{33}$  – электрооптический коэффициент ниобата лития.

При изменении температуры основной вклад в изменение полуволнового напряжения будут вносить изменение показателя преломления  $n_e$  и электрооптического коэффициента ниобата лития. Зависимость полуволнового напряжения  $V_\pi$  от температуры  $T$  можно записать как

$$V_\pi(T) = V_{\pi 0} + \frac{dV_\pi}{dT} T, \quad (4)$$

где  $V_{\pi 0}$  – полуволновое напряжение модулятора при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Изменение полуволнового напряжения с температурой запишется так:

$$\frac{dV_{\pi}}{dT} = \frac{\lambda d}{2L} \frac{d(1/\alpha_{EO})}{dT} = -V_{\pi 0} \frac{1}{\alpha_{EO}} \frac{d\alpha_{EO}}{dT}. \quad (5)$$

В свою очередь, изменение электрооптического коэффициента волновода с температурой примет вид:

$$\frac{d\alpha_{EO}}{dT} = -\frac{1}{2} E_z \frac{dn_e^3}{dT} r_{33} - \frac{1}{2} E_z n_e^3 \frac{dr_{33}}{dT} = \alpha_{EO} \left( \frac{3}{n_e} \frac{dn_e}{dT} + \frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT} \right). \quad (6)$$

Таким образом, учитывая (5) и (6), уравнение (4) примет вид:

$$V_{\pi}(T) = V_{\pi 0} (1 + \kappa T), \quad (7)$$

где  $\kappa$  – температурный коэффициент полуволнового напряжения, который можно записать так:

$$\kappa = - \left( \frac{3}{n_e} \frac{dn_e}{dT} + \frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT} \right). \quad (8)$$

Величина показателя преломления  $n_e$  ниобата лития для длины волны 1550 нм составляет 2,138,  $dn_e/dT$  – температурный коэффициент показателя преломления и составляет  $3,91 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  [13], а величина  $\frac{1}{r_{33}} \frac{dr_{33}}{dT}$  составляет  $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  [14]. Таким образом, температурный коэффициент полуволнового напряжения  $\kappa \approx -5,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

## 2. Методики измерения

### 2.1. Интерферометр Маха – Цандера

Для измерения полуволнового напряжения СИОМ собирается интерферометр Маха – Цандера, образованный фазовым модулятором и волоконным делителем (С1), как показано на рис. 2.



Рис. 2. Схема интерферометра Маха – Цандера для измерения полуволнового напряжения

С генератора подается пилообразное напряжение, амплитуда которого значительно превышает значение полуволнового напряжения. На фотоприемнике (ФП) наблюдается гармонический сигнал, представляющий передаточную характеристику интерферометра (рис. 3) [15]. Разница напряжений пилообразного сигнала между моментами времени, когда интерференционная картина достигает минимального значения, соответствует удвоенному значению полуволнового напряжения.

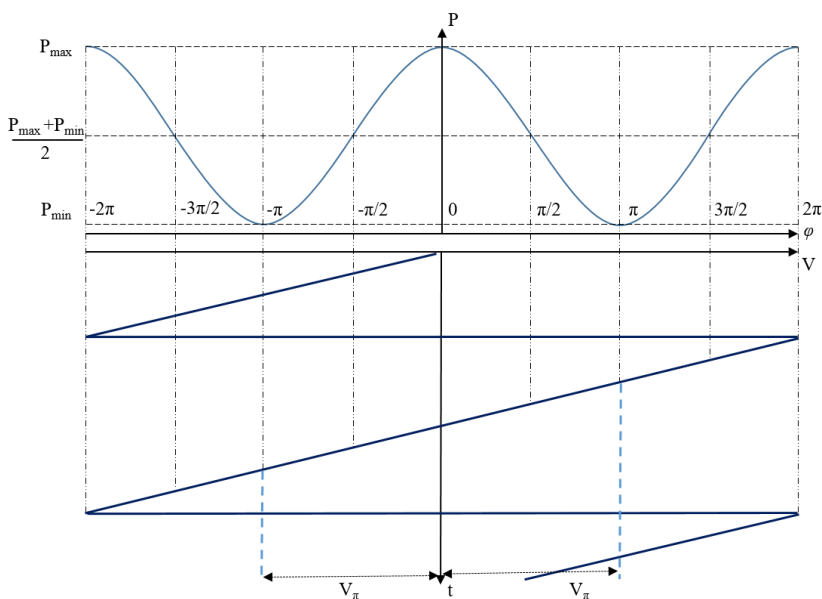


Рис. 3. Передаточная характеристика интерферометра и связь с подаваемой пилообразной модуляцией на СИОМ

Данный метод позволяет получить не только значение полуволнового напряжения, но также самой передаточной характеристики интерферометра. Использование лазерного источника обуславливается высокой длиной когерентности, поскольку при создании волоконного интерферометра сложно соблюсти равенство плеч интерферометра [16]. В случае использования широкополосного источника излучения может возникнуть ситуация, когда интерференционная картина не будет наблюдаться из-за превышения максимальной разницы между плечами интерферометра, определяемой длиной когерентности. Так, например, при использовании суперлюминесцентного диода (СЛД) с центральной длиной волны 1550

нм и шириной спектра 10 нм длина когерентности составит 240 мкм. Такая длина когерентности не позволит провести измерение с волоконным интерферометром Маха – Цандера, т.е. СЛД не пригоден для такого метода измерений.

## 2.2. Интерферометр Саньяка

Второй метод основан на применении интерферометра Саньяка, представленного на рис. 4 [17], в котором излучение от СЛД проходит через циркулятор (С2), затем разделяется на два пучка в СИОМ. Далее оба пучка проходят по волоконному контуру (ВК) во встречных направлениях и снова возвращаются в СИОМ, где объединяются и после прохождения через С2 интерферируют на ФП.

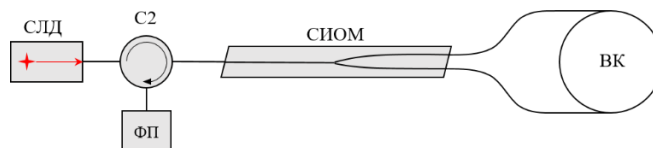


Рис. 4. Схема интерферометра Саньяка для измерения полуволнового напряжения

С генератора подается прямоугольный сигнал на собственной частоте интерферометра. Собственная частота определяется длиной ВК как [4]

$$f_p = \frac{1}{2\Delta\tau} = \frac{c}{2nL}, \quad (9)$$

где  $\Delta\tau$  – время обхода контура,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления волокна,  $L$  – длина ВК.

Амплитуда сигнала модуляции  $A_{\text{mod}}$  при измерениях изменяется между двумя положениями:

- $A_{\text{mod}_1} < V_\pi$ , при этом мощность на фотоприемнике  $P_1$ :  $P_{\text{min}} < P_1 < P_{\text{max}}$ ;
- $A_{\text{mod}_2} > V_\pi$ , при этом  $A_{\text{mod}_2}$  подбирается таким образом, что мощность на фотоприемнике  $P_2 = P_1$ .

Среднее значение между  $A_{\text{mod}_1}$  и  $A_{\text{mod}_2}$  будет соответствовать значению  $V_\pi$  (рис. 5).

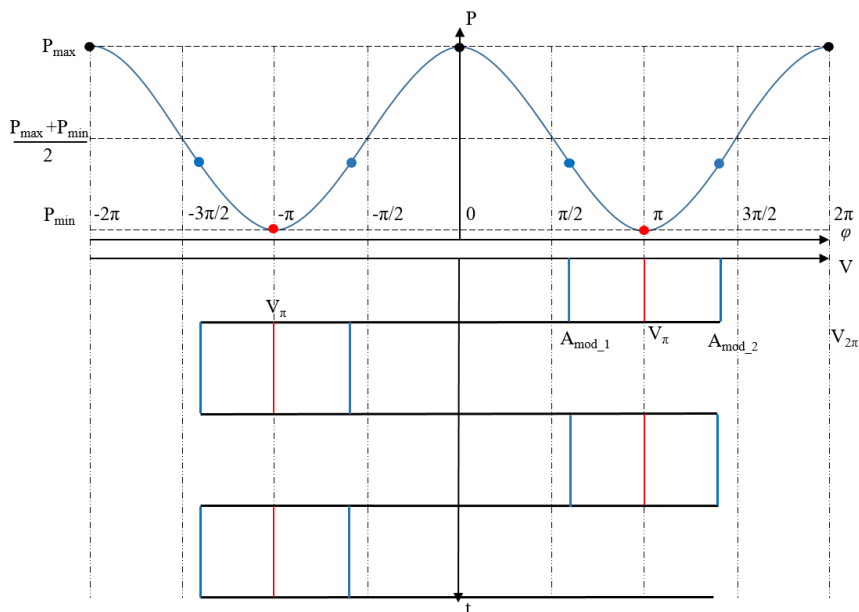


Рис. 5. Передаточная характеристика интерферометра Санюка и связь с подаваемой прямоугольной модуляцией

Для большей точности  $A_{\text{mod}_1}$  и  $A_{\text{mod}_2}$  следует выбирать вблизи напряжения, соответствующего разности фаз  $\pi/2$ , поскольку в этой области проявляется наибольшая чувствительность.

Данный метод позволяет использовать широкополосное излучение, поскольку интерферирующее излучение проходит один и тот же путь, но в разных направлениях, и разность хода, вызванная различием длин оптических путей, не возникает. Узкополосное лазерное излучение с большой длиной когерентности в данном случае, из-за наличия обратного рассеяния и отражения, вызывает паразитную интерференцию, которая вносит изменения в форму сигнала и, соответственно, большую погрешность в измерения [18].

### 3. Результаты эксперимента

В ходе эксперимента проведены измерения полуволнового напряжения СИОМ двумя методиками в диапазоне температур  $-40...+60$  °С. СИОМ помещался в термокамеру, внутри которой температура изменялась в диапазоне от  $-40$  до  $+60$  °С с шагом в  $10$  °С. Исследуемый образец выдерживался час на каждом шаге для

установления постоянной температуры внутри камеры и вокруг СИОМ. По данным измерения построены графики зависимости  $V_{\pi}(T)$ , приведенные на рис. 6.

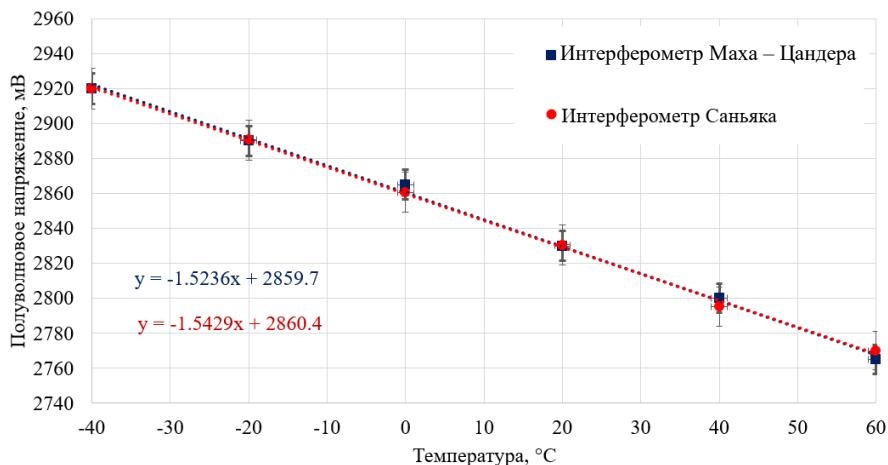


Рис. 6. Графики зависимости полувольтного напряжения СИОМ от температуры, полученные при измерении двумя методиками

По данным графиком определены полувольтное напряжение при температуре  $0^\circ\text{C}$ , а также температурный коэффициент полувольтного напряжения  $\kappa$  для исследуемого образца СИОМ производства ПАО «ПНППК». Данные приведены в таблице.

#### Характеристики полувольтного напряжения СИОМ

Параметр	Методика измерения		
	Теоретический расчет	Интерферометр Маха – Цандера	Интерферометр Саньяка
$V_{\pi 0}$ , мВ	2860,0	$2859,7 \pm 9,5$	$2860,4 \pm 9,4$
$\kappa$ , $10^{-4} \text{K}^{-1}$	-5,2	-5,32	-5,39

Полученные значения  $\kappa$  близки к теоретическим расчетам, что свидетельствует о хорошей точности применяемых методик измерения.

#### Заключение

В данной работе представлены методики измерения полувольтного напряжения фазового модулятора СИОМ. Измерены значения полувольтного напряжения и температурного коэффициента



изменения полуволнового напряжения. Полученные значения температурного коэффициента близки к теоретическому, что свидетельствует о высокой точности представленных методик измерения. Данный коэффициент является важной характеристикой СИОМ при проектировании волоконно-оптических гироскопов. Проверка обеих методик с использованием излучения с разной степенью когерентности была важной задачей, поскольку последние годы ведется активная разработка резонаторных волоконно-оптических гироскопов, в которых возможно применение обоих типов излучения.

### Список литературы

1. Fiber optic resonators for angular rate sensors / D.G. Gilev, K.A. Ovchinnikov, V.V. Krishtop [et al.] // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2022. – Vol. 86 (Suppl 1). – P. S75–S80. DOI: 10.3103/S1062873822700423
2. A prototype for a passive resonant interferometric fiber optic gyroscope with a  $3 \times 3$  directional coupler / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop, A.B. Volynsev, V.A. Maximenko, A.A. Garkushin, Y.V. Filatov, A.S. Kukaev, A.A. Sevryugin, E.V. Shalymov [et al.] // *Sensors.* – 2023. – P. 23. – P. 1319. DOI: org/10.3390/s23031319
3. Experimental investigation of an optical resonator gyroscope with a Mach – Zehnder modulator and its sensitive elements / Y.V. Filatov, D.G. Gilev, P.S. Goncharova, V.V. Krishtop, A.S. Kukaev, K.A. Ovchinnikov, A.A. Sevryugin, E.V. Shalymov, V.Y. Venediktov // *Photonics.* – 2023. – Vol. 10. – P. 4. DOI: 10.3390/photonics10010004
4. Lefevre, Herve. *The Fiber-Optic Gyroscope* / Herve Lefevre // Third Edition. – Artech, 2022.
5. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / Wu Fan, Li Jun, Lan Shiqi, Yan Bo, Zhou Jun, Yue Yazhou // *Optics Communications.* – 2023. – Vol. 550. – P. 129827. DOI: 10.1016/j.optcom.2023.129827
6. Wang Linglan, Yan Yuchao, Ma Huilian, Jin Zhonghe. Research progress of the resonant fiber optic gyroscope technology. – 2015. – 967906. DOI: 10.1117/12.2197580
7. Resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation and double demodulation technique / L. Liu, S. Liu, J. Hu, H. Ma, Z. Jin // *Opt Express.* – 2022. – Mar 28. – Vol. 30(7). – P. 12192–12203. DOI: 10.1364/OE.458596. PMID: 35473145
8. Terrel, Matthew. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber / Matthew Terrel, Michel Digonnet, Shanhui Fan // *IEEE/OSA Journal of Lightwave*

Technology – J. Lightwave Technol. – 2012. – Vol. 30. – P. 931–937. DOI: 10.1109/JLT.2011.2177959

9. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry / Shuangxiang Zhao, Qingwen Liu, Yuanyuan Liu, Huilian Ma, Zuyuan He // Photon. Res. – 2022. – Vol. 10. – P. 542–549.

10. Closed-loop resonant fiber-optic gyroscope with a broadband light source / J. Hu, S. Liu, L. Liu, H. Ma // Journal of Lightwave Technology. – 2023. – Vol. 41, no. 18. – P. 6088–6093. – 15 Sept.15. DOI: 10.1109/JLT.2023.3270443

11. Performance improvement of white-light-driven resonant fiber optic gyroscope using four-frequency sawtooth wave modulation technology / Fan Wu, Jun Li, Shiqi Lan, Bo Yan, Jun Zhou, Yazhou Yue // Optics Communications. – 2024. – Vol. 550. – P. 129827. DOI: 10.1016/j.optcom.2023.129827

12. Rongqing, Hui, Chapter 7: External electro-optic modulators. Editor(s): Rongqing Hui, Introduction to Fiber-Optic Communications. – Academic Press. – 2020. – P. 299–335. DOI: 10.1016/B978-0-12-805345-4.00007-X

13. Smith, D.S. Refractive indices of lithium niobate / D.S. Smith, H.D. Riccius, R.P. Edwin // Optics Communications. – 1976. – Vol. 17, Iss. 3. – P. 332–335. DOI: 10.1016/0030-4018(76)90273-X

14. Zook, J.D. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub> / J.D. Zook, D. Chen, G.N. Otto // Applied Physics Letters. – 1967. – Vol. 11, no. 5. – P. 159–161.

15. Афанасьев, В.М. Определение величины полуволнового напряжения электрооптического модулятора интенсивности излучения на основе интерферометра Маха – Цендера / В.М. Афанасьев, Р.С. Пономарев // Прикладная фотоника. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 16–24.

16. Application of optical frequency domain reflectometry for the study of polarization maintaining fibers / K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev, V.V. Krishtop [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2022. – Vol. 86 (Suppl 1). – P. S156–S162. DOI: 10.3103/S1062873822700599

17. Измерение величины двулучепреломления волокна типа Panda с помощью интерферометра Саньяка / К.А. Овчинников, В.В. Криштоп, Д.Г. Гилев, В.А. Максименко, А.В. Перминов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 10. – С. 845–851. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-845-851

18. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique / Hanzhao Li, Yi Lin, Lu Liu, Huilian Ma, ZHonghe Jin // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28. – P. 18103–18111.