

## СВЕТОВОДНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ

В. К. Горчаков, В. В. Куцаенко, В. Т. Потапов

Электрооптический эффект Поккельса активно исследуется с целью создания новых средств измерения параметров высокочастотных электромагнитных полей [1-3]. В настоящей работе изучена электрооптическая модуляция света в кристалле силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) в СВЧ поле с целью разработки световодного датчика, в котором оптическое излучение передается по волоконным световодам. Преимущество  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  по сравнению с исследованными ранее гидрофосфатом калия [1] и танталатом лития [2] обусловлено его кубической структурой, в частности изотропностью диэлектрической проницаемости. По сравнению с фосфидом галлия [3] силикат висмута имеет более высокую электрооптическую константу: в статических полях величина  $n^3r$  для GaP составляет 17 пм/В, для  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  — 69 пм/В.

Анализ модуляции поляризованного света показывает, что для индикации высокочастотных полей целесообразно обеспечить модуляцию в режиме оптического квадратичного детектора. В этом случае огибающая высокочастотного импульса регистрируется инерционным фотоприемником, постоянная времени которого  $\tau \gg T$  — периода колебаний электромагнитной волны. Известно, что такая модуляция может быть получена в электрооптическом первичном преобразователе (ПП), рабочая точка которого соответствует квадратичному участку модуляционной характеристики. Особенность модуляции в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  связана с наличием естественной гиротропии. Рассмотрим светопропускание ПП датчика, т. е. оптической системы, состоящей из линейного поляризатора, электрооптического кристалла и анализатора, для случая низкочастотных полей (безинерционный фотоприемник) [4]

$$\frac{P_{\text{НЧ}}(E)}{P_0} = \left[ \cos \frac{\chi Z}{2} \cos(\varphi_0 - \varphi) - \frac{2\theta}{\chi} \sin \frac{\chi Z}{2} \sin(\varphi_0 - \varphi) \right]^2 + \left[ \frac{\Delta\beta}{\chi} \sin \frac{\chi Z}{2} \cos(\varphi_0 + \varphi) \right]^2, \quad (1)$$

где  $\chi = \sqrt{(\Delta\beta)^2 + (2\theta)^2}$  — линейное двупреломление;  $\theta$  — естественная гиротропия;  $\varphi_0$  и  $\varphi$  — угол поляризатора и анализатора соответственно относительно оси, наведенной полем индикатрисы;  $Z$  — длина кристалла;  $\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n^3 r_{\text{ст}} E_i$ ;  $r_{\text{ст}}$  — статический электрооптический коэффициент;  $E_i$  — поле внутри кристалла;  $E_i = k_\phi E_0$ ;  $E_0$  — внешнее электрическое поле;  $k_\phi$  — форм-фактор, зависящий от геометрии кристалла.

В случае инерционного фотоприемника сигнал на выходе датчика формируется в результате усреднения светопропускания ПП (1) с постоянной времени фотоприемника

$$P_{\text{ВЧ}}(E) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P_{\text{НЧ}}(E_i \cos \omega t) d(\omega t). \quad (2)$$

Из второй производной (1) по  $E_0$  видно, что максимум глубины модуляции  $m = [P(E) - P(0)]/P(0)$  в окрестности нуля  $E_0$  достигается при  $\theta z = 90^\circ$ ,  $\varphi_0 = -\pi/4 - \theta Z/2$ ,  $\varphi = \pi/4 + \theta Z/2$ . При этом светопропускание обеспечивается за счет модуляции эллиптичности световой волны. На рис. 1 представлены модуляционные характеристики датчика, рассчитанные по (1) и (2) соответственно (кривые 1, 2). При расчете принято  $\lambda = 0.86$  мкм,  $n = 2.52$ ,  $\theta = 11.25^\circ/\text{мм}$ ,  $Z = 8$  мм,  $k_\phi = 0.31$ ,  $r_{\text{ст}} = 4.4 \cdot 10^{-12}$  м/В,  $\varphi_0 = -90^\circ$ ,  $\varphi = 77^\circ$ .

В эксперименте для получения опорного сигнала в отсутствие поля выбрано значение  $\varphi = 77^\circ$ , которое соответствует светопропусканию  $P(0)/P_0 = 0.05$ . При этом крутизна характеристики  $P(E)/P_0$  уменьшается несущественно по сравнению со случаем  $\varphi = 90^\circ$ .

Экспериментальный образец датчика разработан для испытаний в СВЧ волноводе. Точный расчет электрического поля в кристалле с учетом интерференции СВЧ волны при наличии отверстий в стенках СВЧ волновода и диэлектрической вставке, размеры которой

соизмеримы с длиной СВЧ волны, является сложной задачей. Поэтому в данной работе приоритет отдан эмпирической проверке.

Экспериментально изучен датчик, включающий импульсный источник света 1, двухжильный волоконно-оптический кабель длиной 30 м 2, ПП 3, фотоприемник 4. Разработанный ПП представлен на рис. 2. Чувствительный элемент выполнен в виде цилиндра  $\varnothing 1.5 \times 8$  мм, ось которого совпадает с кристаллографической осью  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Длина ПП около 40 мм, диаметр 4 мм. Металлические трубки на корпусе ПП являются заградительными волноводами для СВЧ волны и служат для защиты клееных соединений и полимерных поляризаторов от температурных воздействий мощной СВЧ волны. ПП представляет собой неразъемное устройство, склеенное с входной стороны с волоконно-оптическим кабелем, который подключается к источнику света. Для установки в отверстие волновода ПП имеет с выходной стороны отрезок световода («хвост») длиной около 3 м и без разъема на конце. После проделывания световода с ПП через отверстие в СВЧ волноводе на свободный конец световода устанавливается оперативный разъем, который стыкуется через соединительную втулку со вторым световодом волоконно-оптического кабеля, который подключается к фотоприемнику.

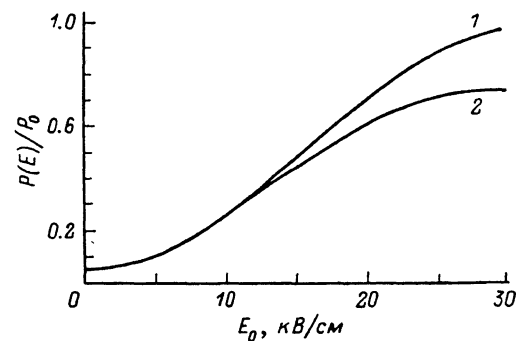


Рис. 1. Модуляционные характеристики ПП датчика (расчет).

1 — амплитудное значение статического поля, 2 — среднеквадратичное значение высокочастотного поля.

которого подавалось высокое напряжение с частотой около 300 Гц. Напряжение с выхода фотоприемника поступало на цифровой вольтметр, который индицировал среднее значение выходного напряжения. Высокое напряжение непосредственно контролировалось вольтметром С196. Экспериментальные значения хорошо согласуются с численным расчетом (2) при указанных выше параметрах. Так, в полях 3, 6, 7.5 кВ/м расчетные значения  $\Delta P(E)/P_0 = [P(E) - P(0)]/P_0$  составили 2.0, 8.0, 12.0 %, а экспериментальные значения 2.42, 8.60, 12.83 % соответственно. Результаты калибровки в логарифмическом масштабе представлены

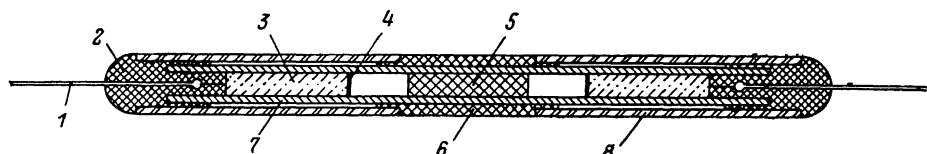


Рис. 2. Конструкция ПП датчика.

1 — многомодовый градиентный волоконный световод, 2 — эпоксидный держатель, 3 — градиентная линза, 4 — пленочный поляризатор, 5 — чувствительный элемент, 6 — фторопластовая трубка, 7 — стеклянная трубка, 8 — металлическая трубка.

на рис. 3, где  $\text{tg } \alpha = 2$ . Подтверждается квадратичная зависимость глубины модуляции от поля. Небольшое уменьшение тангенса наклона при значениях  $E_0 > 6$  кВ/см согласуется с теоретической кривой 2 на рис. 1.

Для апробации в высокочастотных полях ПП датчика помещался в поле бегущей волны 8 мм СВЧ волновода. ПП вставлялся в отверстия (4 мм) в широких стенках таким образом, что в высокочастотное поле помещалась часть ПП, включающая чувствительный элемент в стеклянной трубке и фторопластовой оболочке. Влияние конечных размеров диэлектрической вставки (кристалла) можно характеризовать с учетом того, что длина СВЧ волны в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  соизмерима с диаметром чувствительного элемента  $D$  при  $\epsilon \approx 38$  на частотах 1–10 ГГц  $[^5] D \approx \Lambda_0/\sqrt{\epsilon} \approx 1.30$  мм.

Периодический сигнал СВЧ поля микросекундной длительности синхронизовался с оптическим импульсом длительностью около 10 нс. Запуск высоковольтных формирователей СВЧ волны и оптического импульса осуществляется от внешнего генератора. Источник света изготовлен на основе полупроводникового светодиода с выходной оптической мощностью около 10 мВт. Фотоприемник изготовлен на основе  $p-i-n$  фотодиода, полоса ре-

регистрируемых частот 50 МГц, вольт-ваттная чувствительность 250 мВ/мкВт. Диапазон выходных напряжений фотоприемника около 1 В. Величина опорного сигнала  $P(0)$  соответствовала напряжению с выхода фотоприемника около 500 мВ при уровне шума не более 5 мВ. Вследствие гальванической развязки отсутствовали какие-либо наводки на регистрирующую аппаратуру со стороны высоковольтного формирователя СВЧ волны. Экспериментальные результаты представлены на рис. 4, наблюдалось возрастание светопропускания при увеличении поля. Повторение измерений при повороте ПП в волноводе на  $180^\circ$  приводило к тому же результату. Расчет для однородного поля в кристалле (сплошная кривая) получена из (2) с учетом следующих фактов: 1) на частотах выше частот механических резонансов кристалла величина электрооптического эффекта составляет 0.75 от статического,

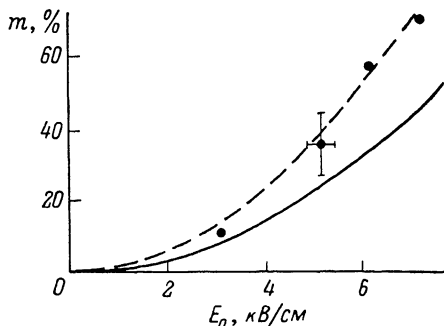
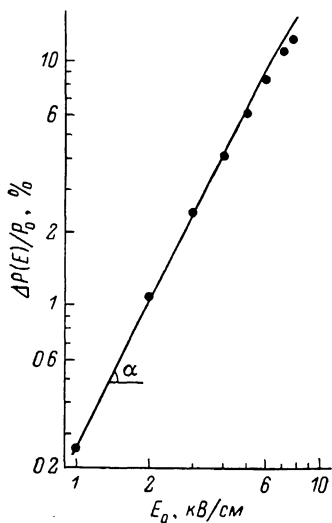


Рис. 3. Калибровка датчика.

←

Рис. 4. Глубина модуляции света в зависимости от среднеквадратичного значения напряженности поля СВЧ волны.

что было установлено в отдельном эксперименте, поэтому принято, что  $r_{\text{СВЧ}} = 0.75 r_{\text{ст}}$ ; 2) в СВЧ поле помещена часть кристалла. В силу этого в (2) введен коэффициент ослабления эффекта, обусловленный параметрами эксперимента,

$$k_{\text{экп}} = \left( \frac{r_{\text{СВЧ}}}{r_{\text{ст}}} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\pi d}{2Z} \right). \quad (3)$$

Расстояние  $d$  между широкими стенками волновода равно 3.4 мм, таким образом, в данном эксперименте  $k_{\text{экп}} = 0.22$ . Экспериментальные результаты (точки) аппроксимируются штриховой кривой. В оценку погрешности входят погрешности определения высокочастотного значения  $r$  (около 5%), определения отношения  $\Delta P(E)/P(0)$  по измеренному с помощью осциллографа значению отношения выходных напряжений  $\Delta U(E)/U(0)$  (10%), определения среднеквадратичного значения напряженности электрического поля СВЧ волны по данным измерения мощности с помощью калориметрического измерителя мощности (10%). Проблематично оценить вклад в погрешность, связанный с форм-фактором  $k_f$  и неоднородностью поля в волноводе.

Таким образом, наблюдалось как качественное, так и количественное соответствие расчета и показаний экспериментального макета датчика. Во-первых, получена квадратичная зависимость глубины модуляции света от поля в низкочастотных и СВЧ полях, во-вторых, глубина модуляции в эксперименте согласуется с оценкой на основе (2) и (3) лучше, чем по порядку величины. Разработанный датчик может быть взят за основу измерительной системы для контроля сильных импульсных полей.

Авторы благодарят С. Г. Чигарева за помощь при экспериментальной проверке датчика в СВЧ поле.

#### Список литературы

- [1] Chang J., Vittitoe C. N., Neyer B. T., Ballard W. P. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. N 1. P. 4843—4848.
- [2] Wyss J. C., Sheeran S. T. // J. Lightwave Technol. 1985. Vol. LT-3. N 2. P. 316—320.
- [3] Аракелов А. Г., Беровашвили Ю. Н., Геккер И. Р. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 10. С. 2031—2033.

- [4] Куцаенко В. В., Потанов В. Т., Шпилевский Р. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1370—1376.  
[5] Kuwata J., Onoda M., Uchino K., Nomura S. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. Vol. 20. N 8. P. 1608—1610.

Институт радиотехники и электроники АН СССР  
Фрязинская часть  
Московская область

Поступило в Редакцию  
8 января 1990 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 61, в. 3, 1991

© 1991 г.

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

С. И. Годя, С. А. Данилюк, А. С. Ермаков, И. И. Кузьмина, В. В. Никитин,  
А. П. Онохов

### Введение

Эффективность систем когерентно-оптической обработки информации в значительной степени определяется характеристиками устройства ввода информации — пространственно-временного модулятора света (ПВМС). Среди различных типов ПВМС модуляторы на основе структуры фотопроводник—жидкий кристалл (ФП—ЖК) выделяются своей компактностью, технологичностью, малым потреблением энергии, высокой чувствительностью [1]. В настоящее время созданы ПВМС, работающие как в проходящем, так и в отраженном свете [2]. В ряде когерентно-оптических схем, например в схемах с твердотельными ОКГ, необходимо применять ПВМС с фотослоями, обладающими высокой прозрачностью для длин волны более 0.5 мкм. В связи с этим представляется перспективным использование в модуляторе света в качестве фотополупроводника тонких слоев и монокристаллов селенида цинка. Существующие типы структур селенид цинка—ЖК [3] по основным параметрам уступают наиболее совершенным жидкокристаллическим ПВМС, созданным на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников и высокоомного арсенида галлия [2, 4]. В силу ряда причин в них не удалось полностью реализовать такие уникальные свойства селенида цинка, как большое темновое удельное сопротивление ( $10^{12}$  Ом·см), малую подвижность носителей заряда, а также возможность создания гетеропереходов с другими полупроводниковыми соединениями, в частности ZnTe—CdTe.

При разработке данного типа ПВМС мы исходили из того, что попытки создания универсального ПВМС обычно наталкиваются на принципиальные ограничения, поэтому обычно идут по пути принятия компромиссных решений. Так, стремление достичь высокой разрешающей способности и малого уровня пространственных шумов обуславливает необходимость применения в структуре модулятора света аморфных высокоомных фотополупроводников и его питания постоянным напряжением. Однако значительные постоянные времена таких приборов на практике ограничивают их быстродействие [5].

Высокое быстродействие реализовано в ЖК ПВМС на МДП структурах. В то же время их разрешающая способность и уровень пространственных шумов уступают системам фотополупроводник—ЖК.

### Экспериментальные образцы ПВМС

Исследованные образцы представляют собой сэндвич-структуру, слой которой находится между двумя стеклянными подложками диаметром 35 мм с прозрачным проводящим покрытием. Необходимым условием нормальной работы ПВМС такой конструкции является нечувствительность используемого ФП к потоку модулируемого излучения.

В качестве фоточувствительного слоя использовались тонкие (2...4 мкм) слои селенида цинка, изготовленные по специальной методике осаждения в квазивамкнутом объеме, позволяющей получать слои высокой степени однородности по толщине образца. Последнее