

07;12

©1993 г.

ФАЗОВАЯ НЕВЗАИМНОСТЬ В ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С НЕИДЕАЛЬНЫМ ФАЗОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ

*А.П.Андреев, В.Д.Васильев, Б.С.Зафирова,
В.А.Козлов, А.К.Сенаторов, Р.Л.Шубочкин*

Показано влияние неидеальности фазового модулятора (амплитудной и поляризационной модуляции излучения) на величину интерференционного сигнала в волоконном кольцевом интерферометре со схемой синхронного детектирования сигнала. Проведены сравнительные экспериментальные исследования трех типов волоконных фазовых модуляторов в кольцевом интерферометре с поляризованным и деполаризованным излучением.

Одним из элементов, необходимых для построения цельноволоконных оптических схем, является волоконный фазовый модулятор. Наибольшее распространение получил способ модуляции фазы излучения, распространяющегося по волоконному световоду, с помощью периодических механических воздействий на некоторый участок световода. Эти воздействия, создаваемые, например, пьезокерамическими элементами различной формы, в общем случае приводят к периодическому изменению длины модулируемого участка световода, его диаметра и показателя преломления материала световода, т.е. к модуляции фазы излучения [1].

Если фазовая модуляция осуществляется в одномодовых волоконных световодах (ОВС), то в силу малости разности показателей преломления материалов сердцевин и оболочки ОВС и наличия явления двулучепреломления в их поляризационных свойствах вероятно появление амплитудной и поляризационной модуляций излучения, создаваемых механическими воздействиями. Эти модуляции могут служить источниками паразитных сигналов в волоконно-оптических устройствах, например при измерении малых разностей фаз интерферирующих лучей в волоконно-оптических интерферометрах.

В данной работе на примере модели интерференционного сигнала в волоконном кольцевом интерферометре (ВКИ) со схемой синхронного детектирования показано влияние неидеальности фазового модулятора, а именно амплитудной или поляризационной модуляции излучения на первых трех гармониках частоты модуляции, на величину интерференционного сигнала, регистрируемого на частоте модуляции. Проведены сравнительные экспериментальные исследования работы трех типов волокон-

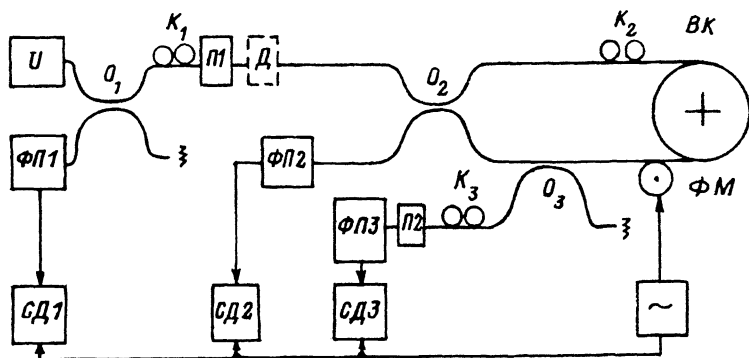
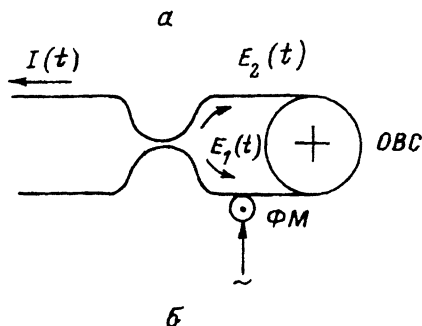


Рис. 1.

ных фазовых модуляторов на основе слабоанизотропных ОВС в макетах ВКИ с поляризованным и деполаризованным излучением.

Общая схема ВКИ показана на рис. 1,а. Она образована направленным ответвителем O и одномодовым волоконным контуром. Фазовый модулятор $\Phi М$ в этом волоконном интерферометре помещается, как правило, у одного из концов волоконного контура.

Предположим, что фазовая модуляция излучения осуществляется по гармоническому закону и сопровождается амплитудной модуляцией. Паразитная поляризационная модуляция будет проявляться в виде амплитудной модуляции интерференционного сигнала.

Для амплитуд встречных лучей в контуре ВКИ можно записать следующие выражения:

$$E_1(t) \sim A_1 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{\varepsilon}'_n \sin n\omega t' \right) \exp i \left(\frac{\Delta\varphi}{2} + \Phi_M \sin \omega t' \right), \quad (1)$$

$$E_2(t) \sim A_2 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{\varepsilon}'_n \sin n\omega(t' - \tau) \right] \exp i \left[-\frac{\Delta\varphi}{2} + \Phi_M \sin \omega(t' - \tau) \right], \quad (2)$$

где A_1, A_2 — некоторые константы; $\tilde{\varepsilon}'_n$ — амплитуды n -й гармоники паразитной модуляции; τ — время прохождения излучения по световоду контура; $\Delta\varphi$ — разность фаз интерферирующих лучей, возникающая вслед-

ствие невзаимных фазовых эффектов, например вращения ВКИ; Φ_M и ω — амплитуда и частота фазовой модуляции.

Интенсивность интерференционного сигнала $I(t) = E(t)E^*(t)$, где $E(t) = E_1(t) + E_2(t)$, а звездочка означает комплексно-сопряженную величину. Учитывая только члены первого порядка малости по n , получим

$$I(t) = C \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n [\sin n\omega t' + \sin n\omega(t' - \tau)] \right\} \times \\ \times \{ 1 + \cos [\Delta\varphi + \Phi_M (\sin \omega t' - \sin \omega(t' - \tau))] \}, \quad (3)$$

где C — константа, зависящая от интенсивности интерферирующих лучей и оптических потерь в схеме ВКИ.

После тригонометрических преобразований, используя разложение в ряд по функциям Бесселя выражений типа $\cos(z \cos \theta)$ и $\sin(z \sin \theta)$, (3) можно записать в виде

$$I(t) = C \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n \sin n\omega t \right\} \times \\ \times \left\{ 1 + \cos \Delta\varphi \left[J_0(\Phi) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\Phi) \cos 2n\omega t \right] - \right. \\ \left. - \sin \Delta\varphi \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(\Phi) \cos(2n+1)\omega t \right] \right\}, \quad (4)$$

где введены обозначения

$$\varepsilon_n = 2\varepsilon'_n \cos \frac{n\omega\tau}{2}, \quad \Phi = 2\Phi_M \sin \frac{\omega\tau}{2}, \quad t = t' - \frac{\tau}{2}.$$

При дальнейшем рассмотрении интерференционного сигнала ограничимся тремя первыми амплитудами паразитной модуляции, соответствующими трем первым гармоникам частоты модуляции ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$). Из спектра интерференционного сигнала $I(t)$ выделим также составляющую на частоте модуляции, $I_\omega(t)$, измеряемую в схемах синхронного детектирования,

$$I_\omega(t) \sim C \sin \omega t \left\{ \varepsilon_1 [1 + J_0(\Phi) \cos \Delta\varphi + J_2(\Phi) \cos \Delta\varphi] - \right. \\ \left. - \varepsilon_2 \sin \Delta\varphi [J_1(\Phi) + J_2(\Phi)] - \varepsilon_3 \cos \Delta\varphi [J_2(\Phi) + J_4(\Phi)] \right\} - \\ - 2C \cos \omega t \sin \Delta\varphi J_1(\Phi). \quad (6)$$

Последний член в (6) соответствует случаю идеального фазового модулятора ($\varepsilon_i = 0$; $i = 1, 2, 3$).

Из выражений (5) и (6) можно сделать следующие выводы.

1. При наличии в схеме ВКИ неидеального фазового модулятора и в отсутствие невязанных фазовых сдвигов ($\Delta\varphi = 0$) составляющая $I_{\omega}(t) \neq 0$, а именно

$$I_{\omega}(t) \sim C \sin \omega t \{ \varepsilon_1 [1 + J_0(\Phi) + J_2(\Phi)] - \varepsilon_3 [J_2(\Phi) + J_4(\Phi)] \}. \quad (7)$$

2. Если частота модуляции выбрана из условия $\omega\tau = \pi$, то, как следует из (5), $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 0$ и $I_{\omega}(t) = 0$ при $\Delta\varphi = 0$ [2].

3. Если $3\omega\tau = \pi$, то $\varepsilon_1 \neq 0$, $\varepsilon_3 = 0$ и при $\Delta\varphi = 0$ величину ε_1 можно определить по величине интерференционного сигнала

$$I_{\omega}(t) \sim C \sin \omega t \varepsilon_1 [1 + J_0(\Phi) + J_2(\Phi)]. \quad (8)$$

4. При $\omega\tau = \pi$ и $\Delta\varphi \neq 0$

$$I_{\omega}(t) \sim C \sin \omega t \varepsilon_2 \sin \Delta\varphi [J_1(\Phi) + J_3(\Phi)] - 2C \cos \omega t \sin \Delta\varphi J_1(\Phi), \quad (9)$$

т.е. при достаточно больших значениях $\Delta\varphi$ выходной сигнал интерферометра содержит информацию о паразитной модуляции на второй гармонике частоты модуляции.

Из представленного анализа зависимости интерференционного сигнала от паразитных амплитуд модуляции фазового модулятора следует, что, анализируя составляющую этого сигнала, только на первой гармонике частоты модуляции при определенных условиях (величина невязанного фазового сдвига равна нулю или отлична от нуля, частоты модуляции удовлетворяют необходимым требованиям) можно определить степень неидеальности работы фазового модулятора. Из (6)–(9) следует, что изменяемым параметром в таком анализе служит эффективная амплитуда фазовой модуляции Φ , являющаяся аргументом функций Бесселя. Несмотря на возможную малость величин ε_i , их наличие может приводить к значительным паразитным сигналам в высокочувствительных ВКИ, предназначенных измерять величины $\Delta\varphi \sim 10^{-7}$ рад.

Для экспериментальных исследований были выбраны три известные конструкции волоконных фазовых модуляторов: пьезокерамический полый цилиндр с внешним диаметром 32 мм с приклеенными к внешней боковой поверхности 20 витками световода [3], модулятор, образованный петлей световода диаметром ~ 3.5 см, основание которой приклеено к пьезокерамической пластине [4], и электромагнитный модулятор на основе покрытого металлом ОВС длиной ~ 2 м, бухта которого диаметром ~ 3 см помещена во внешнее постоянное магнитное поле [5]. При подаче переменного электрического сигнала на электроды пьезоэлектрических элементов или пропускании переменного электрического тока по металлизированному световоду соответствующие участки ОВС испытывают механические воздействия, приводящие к модуляции фазы излучения.

Экспериментальная цельноволокonnая схема ВКИ на основе слабоанизотропных ОВС показана на рис. 1, б. Она была образована одноמודовыми направленными ответвлениями $O_1 - O_3$, волоконными поляризаторами P_1, P_2 , волоконным контуром $ВК$, поляризацiонными контролерами $K_1 - K_3$. В качестве источника излучения I использовались одномодовые волоконно-оптические модули на базе суперлюминесцентного диода (центральная длина волны спектра излучения $\lambda = 815$ нм, ширина спектра $\Delta\lambda = 15$ нм, мощность излучения ~ 400 мкВт) или полупроводникового

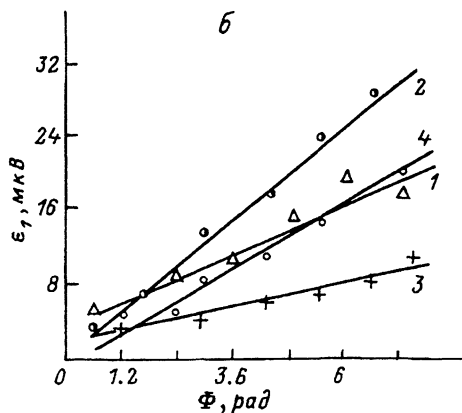
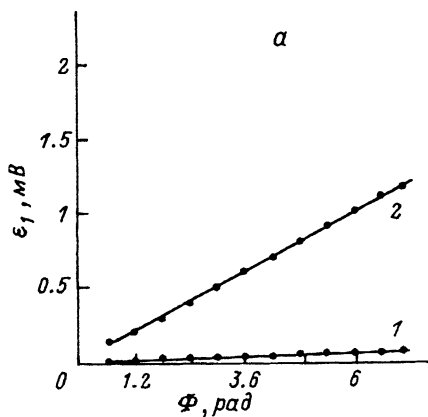


Рис. 2.

лазера ($\lambda = 1300$ нм, $\Delta\lambda \sim 2$ нм, ~ 1 мВт). В первом случае в схеме интерферометра использовался также деполаризатор излучения D со степенью деполаризации $\sim 10^{-2}$ [6]. Все волоконные элементы, кроме деполаризатора, были выполнены из слабоанизотропных $ОВС$ и соединялись друг с другом с помощью электродуговой сварки. Управление фазовыми модуляторами ΦM осуществлялось синусоидальным напряжением звукового генератора, а выходные сигналы с рпн-фотодиодов $\Phi\Pi_1 - \Phi\Pi_3$ измерялись синхронными детекторами $СД_1 - СД_3$. Ответитель O_3 был использован для непосредственного измерения амплитудной (без поляризатора Π_2) или поляризационной (с поляризатором Π_2) модуляции одного из интерферирующих лучей. Сигнал с фотоприемника $\Phi\Pi_1$ в покоящемся ВКИ использовался для измерения зависимости $I_\omega(\Phi)$ в случае $\Delta\varphi = 0$, в то время как сигнал с $\Phi\Pi_2$ — в случае $\Delta\varphi \neq 0$ (фазовая невзаимность создавалась контролером K_2 за счет двулучепреломляющих свойств световода-контра).

Исследования степени неидеальности трех фазовых модуляторов проводились в макете ВКИ с $\lambda = 1300$ нм при использовании в волоконном контуре световода длиной 1870 м, намотанного на катушку диаметром 19 см. Оптимальная частота модуляции ($\omega\tau = \pi$) составляла 54 кГц. Соответствие между амплитудой управляющего электрического сигнала, подаваемого на модуляторы, и эффективной амплитудой фазовой модуляции Φ устанавливалось по гармоническому составу сигнала с $\Phi\Pi_1$. Величина Φ изменялась в диапазоне 0.6–7 рад, представляющем практический интерес. Использование в ВКИ поляризованного излучения (коэффициенты экстинкции поляризаторов Π_1, Π_2 не менее 65 дБ) и слабоанизотропного $ОВС$ в контуре позволяло пренебречь эффектом деполаризации излучения.

На рис. 2,а показана экспериментальная зависимость $\epsilon_1(\Phi)$ для модулятора на основе пьезокерамического цилиндра на оптимальной частоте, полученная с фотоприемника $\Phi\Pi_3$. Прямая 1 соответствует амплитудной модуляции, прямая 2 — сумме амплитудной и поляризационной модуляций. Постоянная составляющая сигнала на выходе $\Phi\Pi_3$ равнялась 0.8 В. На рис. 2,б представлены аналогичные усредненные зависимости для петлевого (прямые 1 и 2; частота модуляции 50 кГц) и электромагнитного

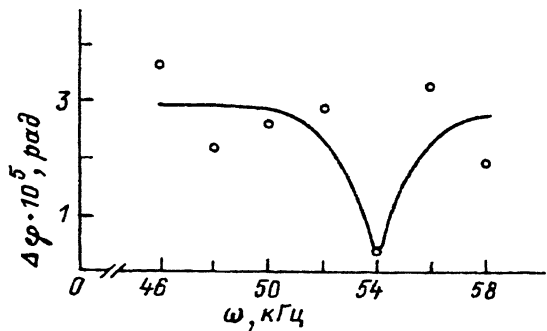


Рис. 3.

(прямые 3 и 4; 38 кГц) модуляторов. Подобные зависимости наблюдались в исследованном диапазоне частот от 18 до 70 кГц. Эффективность пьезокерамических модуляторов в этих экспериментах была близка и составляла ~ 1.2 рад/В.

Увеличение паразитной модуляции излучения при использовании цилиндра объясняется, по-видимому, большей длиной участка световода, подвергаемого механическому воздействию (~ 2 м), чем у петлевого модулятора (~ 2 см). Световод электромагнитного модулятора не имеет прямого контакта с возбудителем механических колебаний, это проявилось в минимальном уровне поляризационной и амплитудной модуляции.

Сканирование частоты фазовой модуляции в окрестности ее оптимального значения 54 кГц (рис. 3) демонстрирует возможность исключения влияния амплитуды паразитной модуляции ε_1 на величину фазовой невязки в ВКИ.

На рис. 4, а показана зависимость выходного сигнала детектора СД₁ на первой гармонике частоты модуляции от величины Φ при работе фазового модулятора на основе пьезокерамического цилиндра. Частота фазовой модуляции не удовлетворяла условию $\omega\tau = \pi$. Сплошная кривая соответствует расчетному изменению величины $1 + J_0(\Phi) + J_2(\Phi)$ (см. (7)). Качественное совпадение расчетных и экспериментальных данных (штриховая кривая) говорит о том, что величина ε_3 мала и не изменяет

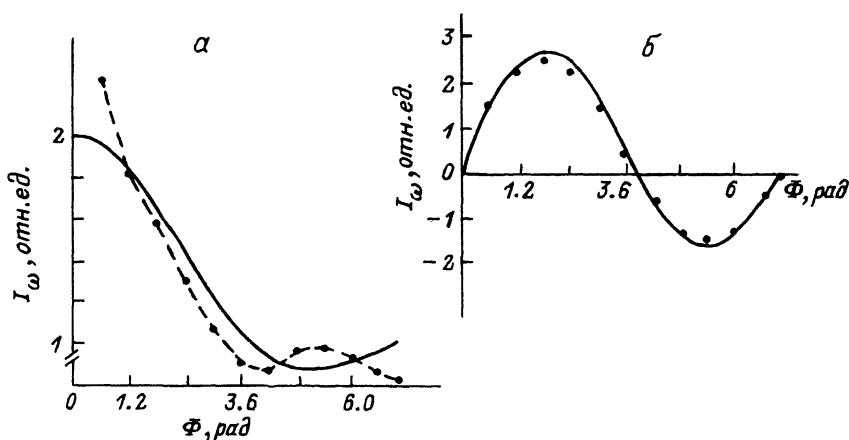


Рис. 4.

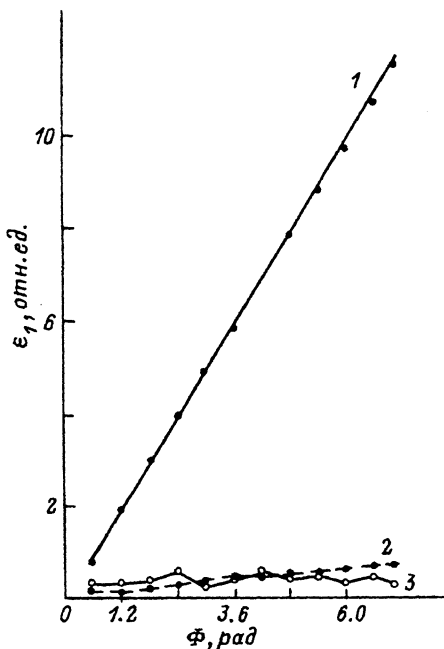


Рис. 5.

величину сигнала I_ω при $\Delta\varphi = 0$, тогда как $\varepsilon_1 \neq 0$ и ее присутствие можно обнаружить, исследуя зависимость $I_\omega(\Phi)$ при $\Delta\varphi = 0$.

Измерения зависимости $\varepsilon_1(\Phi)$ на некоторой частоте фазовой модуляции позволяют оценить величину $\varepsilon_3(\Phi)$ для конкретного модулятора, зная зависимость $I_\omega(\Phi)$, измеряемую фотоприемником $\Phi\Pi_1$ и синхронным детектором $СД_1$. Используя (7) и учитывая оптические потери излучения при переходе от $\Phi\Pi_3$ к $\Phi\Pi_1$, такие оценки были нами выполнены для разных ω и также показали отсутствие паразитной модуляции излучения на частоте 3ω для трех типов модуляторов.

На рис. 4,6 представлена зависимость $I_\omega(\Phi)$, измеренная с помощью фотоприемника $\Phi\Pi_2$ и синхронного детектора $СД_2$ для модулятора на основе цилиндра. Частота модуляции составляла 54 кГц ($\omega\tau = \pi$), величина $\Delta\varphi \sim 0.1$ рад. Сплошная кривая соответствует расчетным значениям $J_1(\Phi)$. Хорошее совпадение экспериментальных точек с этой кривой свидетельствует о малости величины ε_2 , т.е. первым членом (9) можно пренебречь. Величина $\varepsilon_2(\Phi)$ могла быть измерена непосредственно с помощью $\Phi\Pi_3$ и $СД_3$ при регистрации составляющей выходного сигнала на второй гармонике частоты модуляции. Для всех исследованных модуляторов такие измерения подтвердили отсутствие паразитной модуляции излучения на частоте 2ω .

В макете ВКИ с широкополосным источником излучения ($\lambda = 815$ нм длина световода в контуре 2000 м, диаметр контура 19 см) и деполаризатором излучения была измерена паразитная модуляция, создаваемая фазовым модулятором на основе пьезокерамического цилиндра. Конструкция этого модулятора (тип пьезокерамики, длина модулируемого участка ОВС, структура световода) совпадала с конструкцией модулятора, исследованного в макете ВКИ с длиной волны излучения 1300 нм.

Величина паразитной модуляции излучения на первой гармонике частоты модуляции, наблюдаемая с помощью фотоприемника $\Phi\Pi_3$ и синхронного детектора $СД_3$, в этом случае не зависела от присутствия в оптической схеме поляризатора Π_2 , т.е. поляризационная модуляция излучения отсутствовала. Для сравнения на рис. 5 приведены экспериментальные данные по поляризационной и амплитудной модуляциям в ВКИ с $\lambda = 1300$ нм (кривые 1 и 2 соответственно) и амплитудной модуляции в ВКИ с $\lambda = 815$ нм и деполяризатором (кривая 3) на частоте фазовой модуляции 18 кГц. Приведены относительные значения ϵ_1 с учетом среднего уровня выходного сигнала фотоприемника $\Phi\Pi_3$ в соответствующем макете. Уровень амплитудной модуляции двух модуляторов практически совпадает, что и следовало ожидать вследствие подобия их конструкции.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Неидеальность работы волоконных фазовых модуляторов (наличие амплитудной или поляризационной модуляции излучения) может быть обнаружена в ВКИ при измерении зависимости величины составляющей интерференционного сигнала на частоте модуляции от амплитуды фазовой модуляции. Выбор частоты фазовой модуляции, наличие или отсутствие неважных фазовых сдвигов между интерферирующими лучами при таких измерениях позволяют определить амплитуды различных гармоник паразитной модуляции.

2. Минимальный уровень поляризационной и амплитудной модуляции получен в электромагнитном модуляторе, в котором отсутствует в отличие от пьезокерамических модуляторов механический контакт модулируемого участка ОВС с возбудителем колебаний.

3. Для трех исследованных типов модуляторов неидеальность их работы проявляется в амплитудной и поляризационной модуляциях излучения на частоте фазовой модуляции.

4. Паразитная поляризационная модуляция излучения эффективно подавляется в ВКИ с деполяризованным излучением. Влияние амплитудной модуляции может быть исключено только при работе на оптимальной частоте модуляции ($\omega\tau = \pi$) либо при использовании фазовых модуляторов с другими механизмами модуляции излучения.

Авторы признательны В.А.Богатыреву за предоставление световода с металлическим покрытием и А.В.Кузнецову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Davis D., Kingsley S. // Electron. Lett. 1974. Vol. 10. N 2. P. 21–22.
- [2] Bergh R. et al. // Opt. Lett. 1981. Vol. 6. N 10. P. 502–504.
- [3] Martini G. // Opt. Quantum Electron. 1987. Vol. 19. P. 179–190.
- [4] Xervas M., Giles I. // Opt. Lett. 1988. Vol. 13. N 5. P. 404–406.
- [5] Godil A. // J. Lightwave Technol. 1989. Vol. 7. N 12. P. 2052–2054.
- [6] Böhm K., Petermann K., Weidel E. // J. Lightwave Technol. 1983. Vol. LT-1. N 1. P. 71–74.

Институт общей физики
Москва

Поступило в Редакцию
10 октября 1991 г.
В окончательной редакции
25 мая 1992 г.