

рис. 5, в приведена осциллограмма задержанного на 400 мкс входного импульса длительностью 100 нс.

Основные параметры интегрального устройства задержки аналоговых сигналов приведены в таблице.

На основе описанной МДП-линейки фотодиодов, включенной в режиме устройства задержки аналоговых сигналов, целесообразно разработать специализированные приборы задержки путем замены фотодиодов на интегральные конденсаторы. Расположение на одной подложке двух или трех таких УЗАС позволит создать компактные высокопроизводительные устройства обработки изображений [4].

Авторы выражают благодарность Е. С. Нежевенко, М. А. Гофману и С. И. Наймарку за постоянную помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Product Summary: Discrete Time Analog Processing Devices: Проспект фирмы "Reticon Corporation", 1975.
2. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.— М.: Сов. радио, 1976.
3. Кроуфорд Р. Схемные применения МОП транзисторов/Пер. с англ. под ред. М. С. Соинна.— М.: Мир, 1970.
4. Hall J. E., Awtrey J. D. Real-time image enhancement using 3×3 pixel neighborhood operator functions // SPIE Applic. of Digital Image Processing III.— 1979.— V. 207.

Поступила в редакцию 24 февраля 1986 г.

УДК 621.378 : 535.853

**Л. Н. ГУСЬКОВ, В. Н. ЛИСИЦЫН, В. К. МАКУХА,
Н. С. СЛЮСАРЕВ, Л. А. ЮРШИНА**

(Новосибирск)

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР ДЛИН ВОЛН ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Широкое применение перестраиваемых лазеров (на растворах органических красителей, F -центрах, алесандрите) вызвало необходимость создания новых приборов для регистрации длин волн излучения, обладающих достаточно высоким разрешением, удобством съема информации и возможностью автоматизации процесса измерения. Согласно классификации, предложенной в [1], эти приборы можно разделить на динамические (лямбдаметры [2], сканирующие интерферометры Фабри — Перо [3, 4]) и статические (сигмаметры [5], интерферометры Физо [6] и Фабри — Перо [7]). Обладая высоким разрешением, эти приборы имеют и ряд недостатков — динамические измерители длин волн работают только с непрерывным излучением, в то время как для многих экспериментов удобнее использовать лазеры с модуляцией добротности или с разгрузкой резонатора; статические измерители длин волн либо требуют довольно сложной обработки результатов (интерферометры Физо и Фабри — Перо), либо для них необходимо предварительное определение длины волны с точностью 10^{-2} , для чего используется обычный дисперсионный спектрограф [5]. Кроме того, применение статических измерителей длин волн в ИК-диапазоне (скажем, в области 10 мкм) связано с дополнительными трудностями, вызванными сложностью изготовления интерферометрической оптики и фотодиодных матриц в этом диапазоне. Нами предложено для индикации длин волн лазерного излучения с точностью $10^{-3} \dots 10^{-4}$ использовать устройство на основе электрооптиче-

ской модуляции света, которое дает возможность измерять длины волн непрерывного и импульсного (с частотой более 100 Гц) излучения. Такой индикатор не требует применения высококачественной оптики, является малогабаритным, простым и дешевым, работающим в УФ-, видимом и ИК-диапазонах, обеспечивающим автоматизацию измерения и сопряжение с ЭВМ, может использоваться как независимый измеритель длин волн или в качестве прибора для предварительного определения длины волны в измерителях длины волны с высоким разрешением (например, в сигмаметре).

Как известно, интенсивность монохроматического излучения, прошедшего через электрооптический модулятор со скрещенными поляроидами, записывается в следующем виде:

$$I_i = I_i \sin^2 \Gamma/2, \quad (1)$$

где I_i — интенсивность падающего излучения; I_i — интенсивность прошедшего излучения; $\Gamma = \Gamma_o + \Gamma_U$ — суммарный сдвиг фаз в кристалле; Γ_o — компонента, обусловленная естественным двулучепреломлением; Γ_U — составляющая сдвига фаз, вызванная приложенным электрическим полем.

Выражая Γ_U через полуволновое напряжение $U_{\lambda/2}$ [8], получим

$$\Gamma_U = \frac{2\pi}{\lambda} cU = \pi \frac{U}{U_{\lambda/2}}; \quad U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2c}. \quad (2)$$

Здесь λ — длина волны излучения; U — напряжение, приложенное к модулятору; $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение; c — константа, зависящая от типа кристалла, его геометрических размеров и ориентации. Например, для поперечного электрооптического эффекта в кристалле типа KDP

$$c = -\frac{n_o^3}{2} r_{63} \frac{l}{d}, \quad (3)$$

для двойного поперечного электрооптического эффекта в кристалле ниобата лития LiNbO_3

$$c = n_o^3 r_{22} \frac{l}{d}, \quad (4)$$

где n_o — показатель преломления обыкновенного луча; r_{jk} — электрооптический коэффициент; l — длина; d — толщина используемого кристалла.

Как следует из (1), интенсивность прошедшего излучения будет равна 0, если сдвиг фаз в кристалле кратен 2π . При этом из (2) видно, что напряжение на модуляторе должно равняться следующей величине (при $\Gamma_o = 0$):

$$U = 2mU_{\lambda/2} = \lambda m/c, \quad m — \text{целое число.} \quad (5)$$

Из (5) очевидно, что, регистрируя моменты, когда интенсивность излучения на входе модулятора экстремальна, и измеряя в эти моменты напряжение на модуляторе, получаем напряжение, пропорциональное длине волны. Таким образом, в электрооптическом индикаторе длин волн лазерного излучения измерение длины волны сводится к измерению полуволнового (или волнового U_λ) напряжения, соответствующего этой длине волны. Поэтому такой индикатор для удобства будем называть U -лямбдаметр (U_λ -метр).

Как уже упоминалось, конкретный вид коэффициента перед U_λ зависит от электрооптического материала и ориентации кристалла. Наиболее удобным представляется использование поперечного электрооптического эффекта в кристалле DKDP и двойного поперечного эффекта в кристалле LiNbO_3 , обладающих низким полуволновым напряжением. Выпускаемые промышленностью электрооптические модуляторы МЛ-102 и МЛ-5 реализованы на этих эффектах.

Нелинейность в зависимости $U_\lambda(\lambda)$ может быть вызвана дисперсией показателя преломления и r_{jk} . Дисперсионную нелинейность можно устра-

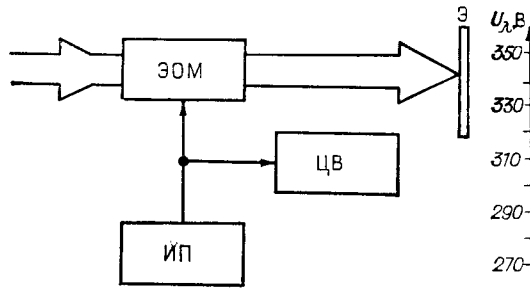


Рис. 1

нить программным путем при обработке результатов на ЭВМ, помещая в память машины либо аналитическую зависимость $n(\lambda)r_{jk}(\lambda)$, либо зависимость в виде констант для каждого диапазона длин волн при предварительной калибровке U_λ -метра. На точ-

ность измерения могут влиять тепловые эффекты, например тепловое расширение кристаллов. Для кристаллов типа KDP это величина порядка $3 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, но, как следует из (3) и (4), в случае поперечного электрооптического эффекта в коэффициент пропорциональности входит отношение длины к толщине кристалла и этот эффект не должен давать значительной погрешности. С изменением температуры может изменяться и произведение показателя преломления на электрооптический коэффициент. Однако по крайней мере в случае LiNbO_3 на длине волны $\lambda = 632,8$ нм для двойного поперечного электрооптического эффекта, по данным работы [9], величина $U_{\lambda/2}$ с точностью до 10^{-4} не зависит от температуры в диапазоне температур от комнатной до 150°C . Следует также учитывать снижение степени дегитерирования и уменьшения r_{jk} для кристаллов типа DKDP. Это можно исключить, регулярно проводя калибровку на известной длине волны. Таким образом, предельное разрешение U_λ -метра должно определяться точностью нахождения экстремума и точностью измерения напряжения. Достигаемая сейчас в промышленных вольтметрах точность измерения напряжения составляет величину порядка 10^{-4} , поэтому ожидаемая предельная точность измерения длин волн, по-видимому, не будет превышать $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Нами были проведены предварительные эксперименты по использованию U_λ -метра для определения длин волн излучения нескольких лазеров. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Лазерное излучение пропускалось через электрооптический модулятор (ЭОМ), в качестве которого использовался промышленный модулятор МЛ-4 на LiNbO_3 . Интенсивность прошедшего излучения регистрировалась визуально на экране Э. На ЭОМ подавалось регулируемое постоянное напряжение от стабилизированного источника питания (ИП). Величина напряжения измерялась цифровым вольтметром (ЦВ). В процессе определения длин волн регистрировались напряжения на модуляторе, соответствующие двум последовательным минимумам интенсивности лазерного излучения на экране, т. е. измерялась величина U_λ . Использовались He-Ne-лазер с $\lambda = 632,8$ нм, вторая гармоника излучения лазера на АИГ:Nd с непрерывной накачкой ($\lambda = 0,532$ нм), работающего в режиме модулированной добротности, и лазер на аргоне с дисперсионным резонатором, излучающий на линиях $\lambda = 514,5$ и $\lambda = 488$ нм.

На рис. 2 приведены результаты измерений. Экспериментальные точки получены при усреднении по тридцати измерениям, указана величина среднеквадратичного отклонения. Как видно из рисунка, в пределах точности измерений в данном спектральном интервале (в котором работает большинство перестраиваемых лазеров на красителе) зависи-

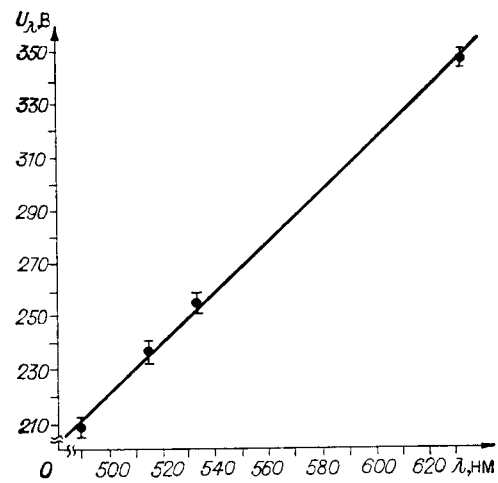


Рис. 2

мость U_λ от λ линейная. В первых замерах относительное отклонение средних значений измеренных длин волн от истинных значений не превышало $5,7 \cdot 10^{-3}$.

Более совершенным является автоматическое измерение длины волны. Предлагаемая функциональная схема такого U_λ -метра показана на рис. 3. Излучение лазера проходит через ЭОМ и попадает на один фотодетектор (ФД), часть излучения перед ЭОМ от-

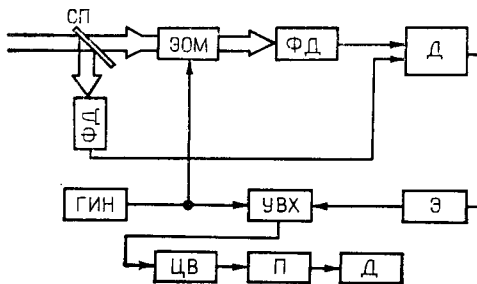


Рис. 3

ветвляется с помощью светоделительной пластинки (СП) на другой ФД. Сигналы с этих детекторов подаются на схему деления (Д), что позволяет уменьшить влияние нестабильности интенсивности излучения лазера. Сигнал с делителя поступает на схему поиска экстремума (Э), которая в экстремальных точках вырабатывает стробирующий импульс. Напряжение с генератора изменяющегося напряжения (ГИН) (величина напряжения превышает U_λ) прикладывается к электрооптическому модулятору ЭОМ и подается на устройство выборки и хранения (УВХ), которое запоминает напряжение на ЭОМ в момент прихода стробирующего импульса со схемы поиска экстремума, т. е. напряжение U_λ , соответствующее минимуму или максимуму пропускания модулятора. Это напряжение замеряется цифровым вольтметром (ЦВ или АЦП), сигнал которого в цифровом виде поступает в процессор (П) и на дисплей (Д).

Таким образом, предлагаемый U_λ -метр может быть легко реализован на основе серийно выпускаемых изделий: электрооптического модулятора, цифрового вольтметра, микропроцессора или микроЭВМ — и применяться либо в виде самостоятельного устройства, либо совместно с приборами, имеющими высокое спектральное разрешение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Snyder J. J. Laser wavelength meter // Laser Focus.— 1982.— V. 18, N 5.— P. 55—61.
2. Hall J. L., Lee S. A. Interferometric real-time display of cw dye laser wavelength with sub-Doppler accuracy // Appl. Phys. Lett.— 1976.— V. 29, N 6.— P. 367—369.
3. Silimberri R., Pole R. V. Compact high-accuracy wavemeter // Opt. Lett.— 1980.— V. 5, N 2.— P. 39—41.
4. Густырь Л. Я., Пучков В. Н., Торопов А. К., Федоров Ю. А. Прибор для измерения длин волн лазерного излучения // Измер. техника.— 1981.— № 10.
5. Jurcar P., Pinard J. Instrument to measure wave number of cw and pulsed laser lines: The sigmometer // Rev. Sci. Instrum.— 1982.— V. 53, N 7.— P. 939—948.
6. Снайдер Дж. Дж. Малогабаритный волномер для импульсного и непрерывного лазерного излучения // Квантовая электрон.— 1978.— Т. 5, № 8.
7. Konishi N., Suzuki T., Taira V., Kato H., Kasuya T. High precision wavelength meter with Fabry — Perot optics // Appl. Phys.— 1981.— V. 25.— P. 311—316.
8. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света.— М.: Наука, 1970.
9. Zook J. O., Chen D., Otto G. N. Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO_3 // Appl. Phys. Let.— 1967.— V. 11, N 5.— P. 159—161.

Поступила в редакцию 5 мая 1986 г.