



Рис. 5

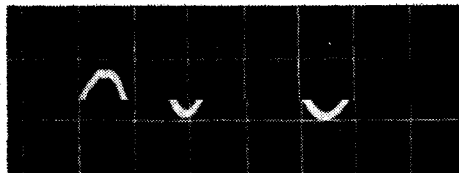


Рис. 6

где i — номер итерации; $k = 1, 2, \dots$ — номер минимума. На рис. 5, 6 приведены осциллограммы отфильтрованного дифракционного распределения интенсивности при $N = 10$ и $N = 50$ элементов соответственно.

В эксперименте с вышеуказанными параметрами при окне фильтра $N = 20$ элементов получена погрешность измерения 1 мкм. В основном эта погрешность определялась ценой деления раздвижной щели УФ-2. Увеличение N свыше 50 элементов нецелесообразно, так как в этом случае значительно увеличивается время обработки сигнала и возникает необходимость применения в программе дополнительного алгоритма на основе формулы (5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вето А. В., Костюков Е. В., Кузнецов Ю. А., Пресс Ф. П. Фоточувствительные схемы с зарядовой связью: состояние и перспективы развития // Электрон. пром-сть.— 1982.— Вып. 7.
2. Евсеев Н. И., Козачок А. Г., Солодкин Ю. Н. Анализ дифракционных способов измерения линейных размеров // Метрология.— 1984.— № 2.
3. Обработка изображений и цифровая фильтрация/Под ред. Т. Хуанга: Пер. с англ.— М.: Мир, 1979.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
5. Пронин С. П., Якунин А. Г. Регистрация минимумов в дифракционном распределении интенсивности щелевой диафрагмой фотоприемника // Робототехника и автоматизация производственных процессов: Тез. докл. Всесоюз. конф.— Барнаул: АПИ, 1983, ч. 6.

Поступило в редакцию 23 декабря 1985 г.

УДК 681.3.04/05

Е. И. ЧЕРНОВ
(Рязань)

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ СТАБИЛИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА УМНОЖЕНИЯ ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

Современные лавинные фотодиоды (ЛФД) являются высокоэффективными приемниками излучения и по своим характеристикам приближаются к ФЭУ [1, 2]. Имея малые массогабаритные показатели и не требуя высоковольтного питания, они существенно упрощают конструкцию многих оптико-электронных приборов. Однако широкое применение ЛФД в настоящее время сдерживается температурной нестабильностью их характеристик.

В статье приведено описание нового эффективного способа стабилизации рабочей точки и коэффициента умножения ЛФД, резко ослабляющего температурную нестабильность фотоприемника. Способ заключается в следующем. На ЛФД подают напряжение смещения, имеющее постоянную и переменную составляющие. Так как коэффициент лавинного умножения M нелинейно зависит от температуры и напряжения смещения [3], то при изменении температуры меняется форма токового сигнала ЛФД, обусловленного переменной составляющей напряжения смещения. Благодаря этому из соотношения токовых сигналов ЛФД, осредненных за период и

полупериод переменного напряжения смещения, можно выделить сигнал рассогласования, зависящий от температуры. При изменении этого сигнала в результате изменения температуры и других факторов изменяют в равной степени как постоянное напряжение смещения E , так и амплитуду u_M переменного напряжения смещения до тех пор, пока значение сигнала не восстанавливается. Зависимость коэффициента умножения M от смещения можно аппроксимировать следующим образом [3]:

$$M = 1 / \left[1 - \left(\frac{E + u_M \cos \omega t}{U_{\Pi}} \right)^n \right], \quad (1)$$

где ω — частота переменной части напряжения смещения ($n = 1-6$) для разных типов ЛФД; U_{Π} — напряжение пробоя, которое является функцией температуры, причем изменение U_{Π} от температуры можно учесть температурным коэффициентом β .

На рисунке представлена функциональная схема фотоприемного устройства (ФПУ), в котором реализован предлагаемый способ. Контур системы стабилизации в этом ФПУ в своем составе имеет операционный усилитель ОУ1; электронные ключи Кл1, Кл2 с разделительными конденсаторами $C1, C2$ и фильтры низкой частоты Ф1, Ф2, обеспечивающие выделение сигнала рассогласования, зависящего от температуры; операционный усилитель ОУ2; аналоговый множитель (Умн), обеспечивающий одинаковое изменение постоянного напряжения смещения E и амплитуды u_M переменного напряжения смещения, поступающих соответственно от источника напряжения (ИН) и генератора синусоидального сигнала (ГСС) через сумматор (СМ) на множитель. Для устранения проникновения переменной составляющей напряжения смещения на выходе ФПУ интегратор (И) осуществляет усреднение выходного напряжения ОУ1 за период T . Узел управления (Упр) периодически проводит обнуление интегратора; включение на короткое время в момент, когда напряжение смещения на ЛФД равно $E - u_M$, ключа Кл1; включение на время действия одной из полуволи переменной составляющей напряжения смещения ключа Кл2.

Оценим эффективность стабилизации коэффициента M при выполнении условия

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt - u_{\min} - \frac{K}{T} \int_{-T/4}^{T/4} u(t) dt + \frac{Ku_0}{2} = f = 0, \quad (2)$$

где $u(t)$ — текущее (полное) напряжение на выходе ОУ1, равное $u(t) = i_c(t)RM(t)$, i_c — фототок ЛФД без учета эффекта умножения, R — сопротивление резистора обратной связи ОУ1; u_{\min}, u_0 — значения напряжения на выходе ОУ1 соответственно при напряжении смещения на ЛФД, равном $E - u_M$ и E ; K — коэффициент, обеспечивающий условие баланса при некоторой температуре, например 20°C (задается коэффициентами передачи фильтров Ф1, Ф2).

Значение коэффициента усиления в петле обратной связи выбираем большим. Тогда основная погрешность системы стабилизации возникает из-за температурного дрейфа напряжения смещения ОУ2, который воспринимается системой стабилизации как сигнал рассогласования:

$$\Delta u_c = (de_{OY}/dT^0) \Delta T^0, \quad (3)$$

здесь (de_{OY}/dT^0) — крутизна температурного дрейфа напряжения смещения ОУ2. С другой стороны, сигнал рассогласования с учетом (1), (2) находим в виде

$$\Delta u_c \approx \left(df/dU_{\Pi} \right) \Delta U_{\Pi} = -i_c R M_{\max}^2 \varphi \Delta U_{\Pi} / U_{\Pi}, \quad (4)$$

где

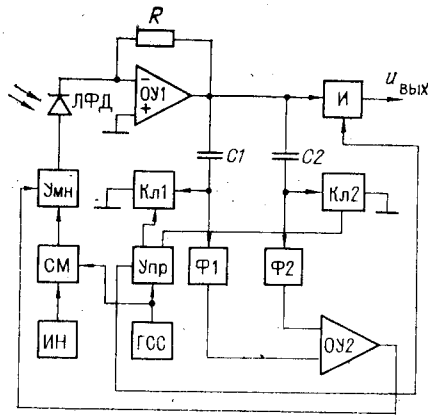
$$\varphi = -x \{ x(x+1) \arcsin [(1-x^2)/(1+x^2)] / 2\pi - (1-x)(2x^2-x^3-1)/4(1+x^2) - (1+x^2)/4 - (1-x^2)x/(1+x^2)\pi + 2x^3/(1+x^2)^2 \}, \quad (5)$$

$x^2 = M_{\min}/M_{\max}$, M_{\min} и M_{\max} определяются при напряжениях смещения ЛФД, соответственно равных $E - u_M$ и $E + u_M$.

Погрешность ФПУ из-за нестабильности M найдем как

$$\delta\% = \Delta u_{\text{вых}} 100\% / u_{\text{вых}}, \quad (6)$$

где $u_{\text{вых}}$, $\Delta u_{\text{вых}}$ — соответственно выходное напряжение ФПУ и его изменение вследствие изменения M .



При определении $u_{\text{вых}}$ рассмотрим два случая: $\bar{M}i_{c \min} \gg i_{\text{ут}}$, $\bar{M}i_{c \min} \sim i_{\text{ут}}$, здесь \bar{M} — среднее значение M за период T ; $i_{c \min}$ — минимальное значение фототока; $i_{\text{ут}}$ — ток утечки ЛФД.

Чтобы в выходном напряжении не было составляющей, обусловленной переменным напряжением смещения, выходное напряжение целесообразно определять в виде

$$u_{\text{вых1}} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt = i_c R M_{\text{max}} x. \quad (7)$$

Для второго случая, чтобы еще устранить и погрешность вследствие изменения тока утечки ЛФД и ее низкочастотной флуктуации,

$$u_{\text{вых2}} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) dt - u_{\text{min}} = i_c R M_{\text{max}} x (1 - x). \quad (8)$$

Делая замену $R = U_{\text{max}}/M_{\text{max}}i_{c \text{max}}$, U_{max} , $i_{c \text{max}}$ — максимальное напряжение на выходе ОУ1 и максимальное значение фототока, из (3), (4), (6)–(8) соответственно находим

$$\delta_{c1}^{\%} = n(1 + x^2) \Delta T^{\circ} (i_{c \text{max}}/\bar{i}_c) (de_{\text{ОУ}}/dT^{\circ}) 100\% / 2\varphi U_{\text{max}}; \quad (9)$$

$$\delta_{c2}^{\%} = n(1 - x + 2x^2) \Delta T^{\circ} (i_{c \text{max}}/\bar{i}_c) (de_{\text{ОУ}}/dT^{\circ}) 100\% / 2\varphi U_{\text{max}}, \quad (10)$$

где \bar{i}_c — среднее значение фототока (интервал усреднения — время накопления фильтров Ф1, Ф2, составляющее не менее 1 с).

Из (9), (10) получаем оптимальное значение $M_{\text{min}}/M_{\text{max}} = x^2 = 0,25$. Сравним стабилизированный и нестабилизированный по M ФПУ. Из (1) при $u_M = 0$ с учетом того, что для достоверного сравнения ФПУ в качестве M следует брать \bar{M} стабилизированного ФПУ, получаем

$$\delta_{\text{нс1}}^{\%} \approx |n\bar{M}_1 \beta \Delta T^{\circ} 100\%|; \quad (11)$$

$$\delta_{\text{нс2}}^{\%} \approx |n\bar{M}_2 \beta \Delta T^{\circ} 100\%|; \quad (12)$$

$$\bar{M}_1 = xM_{\text{max}}; \quad \bar{M}_2 = x(1 - x)M_{\text{max}}. \quad (13)$$

В таблице приведены результаты расчета $\delta_{c1}^{\%}$, $\delta_{\text{нс1}}^{\%}$, $\delta_{c2}^{\%}$, $\delta_{\text{нс2}}^{\%}$ для разных соотношений M_{max} и M_{min} для ФПУ с ЛФД с параметрами $U_{\text{п}} \approx 49$ В при $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$, $M_{\text{max}} = 50$, $n = 1$, $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ 1/°C, рабочий температурный диапазон $\Delta T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$, $i_{c \text{max}}/\bar{i}_c = 20$. Параметры ОУ: $U_{\text{max}} = 10$ В ($de_{\text{ОУ}}/dT^{\circ} = 1$ мкВ/°C). Как следует из таблицы, предложенный способ обеспечивает высокую эффективность стабилизации коэффициента умножения ЛФД.

x^2	\bar{M}_1	$\delta_{c1}^{\%}$	$\delta_{\text{нс1}}^{\%}$	\bar{M}_2	$\delta_{c2}^{\%}$	$\delta_{\text{нс2}}^{\%}$
0,1	15,8	0,09	47	10,8	0,069	32,4
0,2	22,4	0,07	67	12,4	0,054	37,2
0,25	25	0,07	75	12,5	0,056	37,5
0,3	27,4	0,075	82	12,4	0,06	37,2
0,4	31,6	0,095	95	11,6	0,08	34,8
0,5	35,4	0,128	106	10,4	0,11	31,2
0,6	38,7	0,176	116	8,7	0,156	26,1
0,7	41,8	0,215	125	6,8	0,2	20,4
0,8	44,7	0,49	134	4,7	0,47	14,1
0,9	47,4	1,73	142	2,4	1,68	7,2

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернов Е. И. Метод определения оптимальных параметров систем фотометрирования // *Опт.-мех. пром-сть.*— 1984.— № 3.
2. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Чернов Е. И. Система автоматического фотометрирования полутонных изображений на основе лавинного фотодиода с операционным усилителем // *Автометрия.*— 1982.— № 4.
3. Берлизова О. М., Никонов Б. С., Трищенко М. А. Особенности работы лавинного фотодиода с операционным усилителем // *Опт.-мех. пром-сть.*— 1977.— № 8.

Поступило в редакцию 26 июля 1985 г.

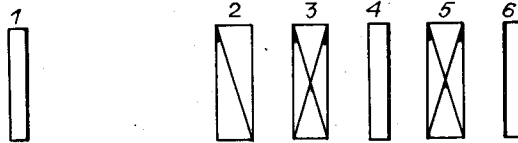
УДК 535.854

А. М. БЕЛКИН, М. И. ЗАХАРОВ
(Новосибирск)

О СЕЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВАХ АНИЗОТРОПНОГО ТРЕХЗЕРКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА

Перспективными устройствами для селекции частот в лазерах являются оптические резонаторы с анизотропными элементами [1—4]. Им свойственны низкие неселективные потери и высокая лучевая стойкость.

В работах [3, 4] рассматривались селективные свойства трехзеркального лазерного резонатора с двумя фазовыми пластинами и частичным поляризатором. Схема устройства приведена на рисунке. Резонатор состоит из последовательно расположенных зеркала 1, линейного поляризатора 2, линейной фазовой пластины 3, зеркала 4, линейной фазовой пластины 5 и зеркала 6. Рабочие поверхности фазовых пластин и вторая поверхность подложки зеркала просветлены. Угол между оптическими осями линейных фазовых пластин 3 и 5 равен β . Минимальный и максимальный энергетические коэффициенты пропускания поляризатора равны P_x и P_y соответственно. Было показано, что эффективная частотная селекция имеет место для вариантов устройства, в которых линейная фазовая пластина 3 четвертьволновая, причем ее оптическая ось ориентирована под углом 45° по отношению к осям поляризатора, а фазовый сдвиг между обыкновенной и необыкновенной волнами, вносимый линейной фазовой пластиной 5 за один проход, равен либо $\pi/2$, либо $\arcsin(1 - R_1)/(1 + R_1)$, где R_1 — энергетический коэффициент отражения среднего зеркала 4.



Анализ влияния на селективные свойства резонатора его параметров в [3] проводился для единственного значения параметра β , а именно $\beta = \pi/4$. В работе [4] анализ ограничен значениями параметра P_x , близкими к нулю.

В настоящей работе рассмотрено влияние параметра β на селективные свойства резонатора, значение параметра P_x которого существенно отличается от нуля. Показано, что характеристики такого резонатора существенно зависят от значения параметра β .

При расчете характеристик полагалось, что обе линейные фазовые пластины четвертьволновые, причем оптическая ось пластины 3 ориентирована под углом 45° по отношению к осям поляризатора, а коэффициенты отражения концевых зеркал 1 и 6 равны единице. (Очевидно, что влияние значения коэффициента отражения выходного зеркала 1 на потери мод резонатора может быть учтено тривиальным образом.) Кроме того, полагалось, что максимальный энергетический коэффициент пропускания поляризатора P_y равен единице. Расчет проводился в приближении плоских волн с использованием матричного метода Джонса [5].

С учетом сделанных предположений матрица Джонса резонатора запишется в следующем виде:

$$M = \frac{\exp(i2\nu L)}{1 + R_1 \exp(i4\nu L_1)} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ν — волновое число; L — полная оптическая длина резонатора; L_1 — оптическая длина отрезка между зеркалами 4 и 6;

$$m_{11} = P_x(1 - R_1)\exp(i2\beta); \quad (2)$$

$$m_{12} = m_{21} = 2i\sqrt{P_x}\sqrt{R_1} \cos(2\nu L_1); \quad (3)$$

$$m_{22} = (1 - R_1)\exp(-i2\beta). \quad (4)$$