

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЗС ФОТОПРИЕМНИКОВ В АКУСТО-ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

© 2008 г. С. С. Шибяев, канд. техн. наук

Технологический институт Южного федерального университета, Таганрог

E-mail: sshib75@mail.ru

Теоретически и экспериментально проанализированы конструкторско-технологические особенности ПЗС фотоприемников, проявляющиеся при сравнительно высоких уровнях интенсивности воздействующих на них оптических сигналов. Даны практические рекомендации по снижению влияния упомянутых особенностей при использовании фотоприемников в составе средств обработки оптической информации.

Коды OCIS: 040.1520, 070.1060, 250.0250.

Поступила в редакцию 06.02.2008.

При обычном применении ПЗС фотоприемников для решения задач спектроскопии, сканирования и оцифровки изображений широко используется определение их динамического диапазона (ДД) как отношение уровня сигнала, соответствующего верхней границе линейного участка амплитудной характеристики ПЗС, к уровню шумов считывания.

Однако в ряде применений линейность амплитудной характеристики не столь критична. Одними из таких применений являются, например, акусто-оптические (АО) средства обработки информации, в частности, АО измерители параметров радиосигналов, в которых не предъявляется жестких требований к точности отсчета уровней принимаемых сигналов, а решается задача определения частотных параметров радиосигналов в экстремально широком диапазоне их входных уровней.

В настоящей работе показано, что “слабым звеном” в достижении высокой динамики АО измерителей или других устройств, где требуется высокий ДД, может выступать фотоприемное устройство (ФПУ), причем ограничение ДД может быть не связано с электрическими параметрами самого ФПУ, его ДД, а определяться конструктивными особенностями его корпуса, элементами защиты фоточувствительной области и самой геометрией (топологией) фоточувствительной площадки многоэлементного ФПУ.

В работе показано, что дифракция “в отраженном свете”, возникающая и проявляющаяся при повышенном уровне светового сигнала на упорядоченной структуре фотодиодов ФПУ, является причиной и источником паразитных световых сигналов. Присутствие последних непосредственно в плоскости ФПУ в конечном счете и ограничивает его полную, сверх линейной динамику.

Вышесказанное иллюстрируется экспериментальной осциллограммой снятого с ФПУ видеосиг-

нала, представленной на рис. 1, на котором, помимо основного полезного сигнала большого уровня наблюдается ряд световых сигналов, образованных дифракционными эффектами. Последние и являются паразитными или помеховыми сигналами, ограничивающими ДД.

Данное явление было обнаружено при использовании ПЗС фотоприемника в составе АО измерителя, детальное описание которого представлено в работе [1].

Для пояснения высказанного утверждения рассмотрим конструкцию исследуемой ПЗС линейки типа ТН7813 производства фирмы “E2v” – рис. 2. Фоточувствительная область *A* обрамлена металлическими электродами с периодом расположения, ориентировочно равным размеру одного фотоэлемента и составляющим 10 мкм. Дифракция сфокусированного на область *A* линейки пучка показана на рис. 3. В этом случае результат дифракции соот-

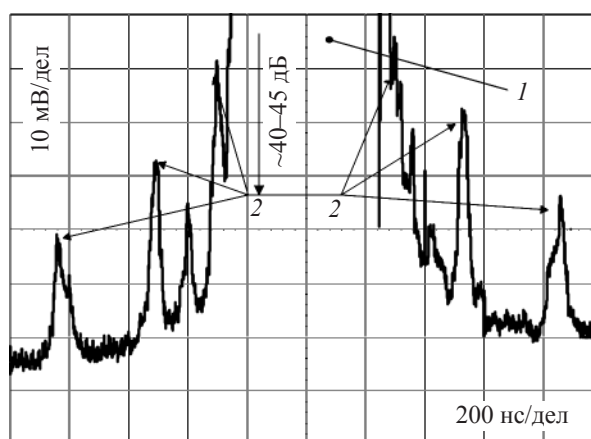


Рис. 1. Осциллограмма видеосигнала с ПЗС фотоприемника. 1 – полезный сигнал, 2 – помеховые сигналы.

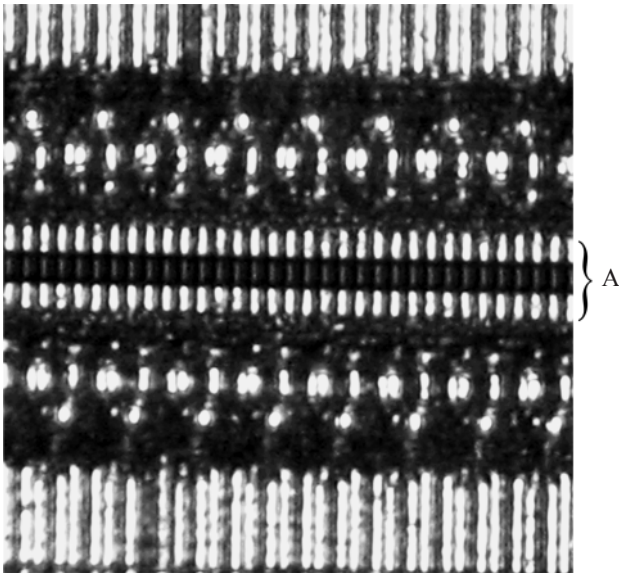


Рис. 2. Микрофотография топологической структуры ПЗС линейки типа ТН7813. *A* – фоточувствительная область.

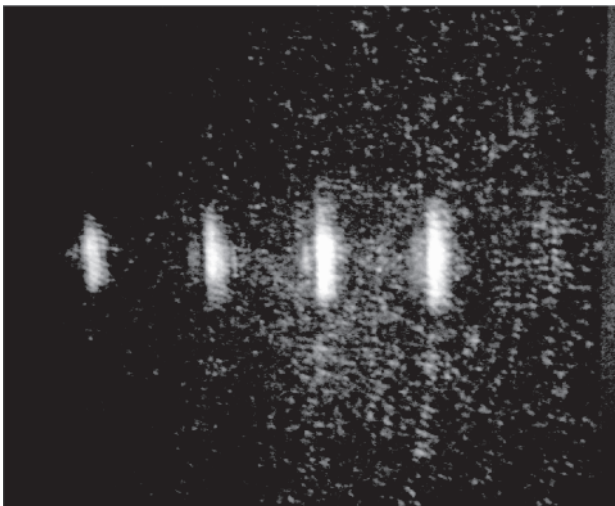


Рис. 3. Картина дифракции сфокусированного на фоточувствительную область ПЗС линейки пучка лазера.

ветствует одномерной решетке, состоящей из межэлементных электродов.

Таким образом, отраженные от структуры ПЗС дифракционные порядки, повторно отразившись от граней покровного стеклянного окна линейки [2], воздействуют на фоточувствительную область приемника и при достаточно высоком уровне светового сигнала дают изображенную на рис. 1 картину.

В работе проведен расчет параметров указанного явления. Для чего задавалось амплитудное рас-

пределение светового пятна в плоскости ФПУ в следующем виде:

$$U_1(x, y) = \exp\left[-\left(x^2/r_x^2 + y^2/r_y^2\right)\right], \quad (1)$$

где r_x и r_y – соответствующие размеры пятна света по уровню $1/e$.

Нормированная интенсивность света (принималась за исходную) в этом случае равна

$$I_1(x, y) = U_1^2(x, y) = \exp\left[-2\left(x^2/r_x^2 + y^2/r_y^2\right)\right]. \quad (2)$$

Периодическая совокупность металлических электродов в промежутках между фотоприемными элементами ФПУ представляет собой отражательную дифракционную решетку (рис. 4), отражающие элементы которой шириной h расположены с периодом d .

Обозначив коэффициент отражения элементов решетки по интенсивности через ρ , амплитудное “пропускание” (в отраженном свете) такой решетки представим в виде

$$C(x, y) = \sqrt{\rho} \sum_{i=-n}^n \text{rect}[(y - id)/h], \quad (3)$$

где количество элементов решетки равно $N = 2n + 1$.

В том случае, когда ширина решетки Nd гораздо больше размеров светового пятна, что хорошо выполняется на практике, ее можно считать бесконечно протяженной, положив в (3) $n = \infty$.

Тогда спектральная функция решетки равна

$$S(v_x, v_y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \delta[v_x, (v_y - kv_0)], \quad (4)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок дифракции, v_x, v_y – пространственные частоты по соответствующим осям, $v_0 = 1/d$, c_k – коэффициенты разложения амплитудного “пропускания” решетки $C(x, y)$ в ряд Фурье

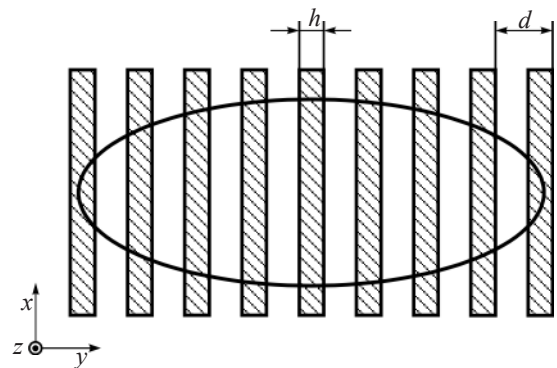


Рис. 4. Модель одномерной отражательной дифракционной решетки.

$$C(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp(j2\pi k v_0 y), \quad (5)$$

причем коэффициенты c_k находятся из выражения

$$c_k = (1/d) \int_{-0,5d}^{0,5d} C(x, y) \exp(-j2\pi k v_0 y) dy. \quad (6)$$

Учитывая, что амплитудный спектр продифрагировавшего на решетке светового поля в фраун-

гоферовском приближении [3] можно представить как

$$U_2(v_x, v_y) = [\exp(j2\pi z/\lambda)/j\lambda z] \times \exp[j\pi\lambda z(v_x^2 + v_y^2)] F[U_1(x, y)] * S(v_x, v_y), \quad (7)$$

где $F[U_1(x, y)]$ – спектр функции $U_1(x, y)$, а знак * обозначает свертку функций. Для спектра света, “отразившегося” от решетки, получается

$$U_2(v_x, v_y) = [\exp(j2\pi z/\lambda)/j\lambda z] \exp[j\pi\lambda z(v_x^2 + v_y^2)] \pi r_x r_y \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[c_k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\pi^2 r_x^2 \xi_x^2) \exp(-\pi^2 r_y^2 \xi_y^2) \delta[(v_x - \xi_x), (v_y - kv_0 - \xi_y)] d\xi_x d\xi_y \right] = \exp[j(2\pi z/\lambda + \pi\lambda z(v_x^2 + v_y^2))] \times [\pi r_x r_y / j\lambda z] \exp(-\pi^2 r_x^2 v_x^2) \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp[-\pi^2 r_y^2 (v_y - kv_0)^2]. \quad (8)$$

Учитывая, что $v_x = x/\lambda z$, $v_y = y/\lambda z$, и принимая во внимание отражение от входного стекла ФПУ (коэффициент отражения по интенсивности – Γ), для распределения интенсивности про-

дифрагировавшего на структуре ФПУ, затем отраженного от входного стекла и вновь воздействующего на фотоприемные элементы ФПУ света, получаем

$$I_2(x, y) = \Gamma (\pi r_x r_y / \lambda z)^2 \exp[-2(\pi r_x x / \lambda z)^2] \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp[-\pi^2 r_y^2 (y/\lambda z - kv_0)^2] \right|^2. \quad (9)$$

Расчитанное согласно выражению (9) распределение интенсивности в плоскости $x = 0$ для: $\lambda = 0,657$ мкм, $d = 10$ мкм, $h = 2$ мкм, $r_{0x} = 5$ мкм, $r_{0y} = 10$ мкм, $\rho = 0,5$, $\Gamma = 0,1$, $z = 2$ мм, представлено на рис. 5.

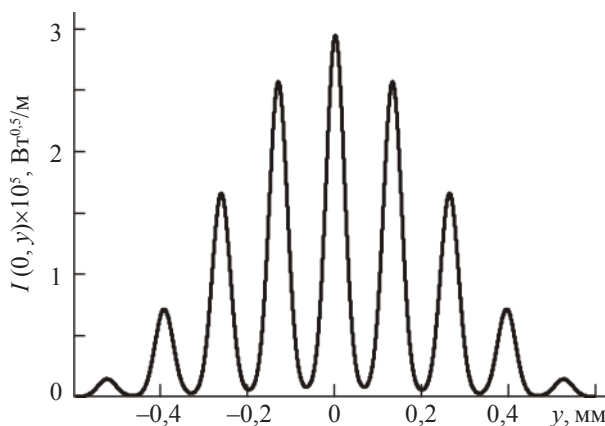


Рис. 5. Расчетное распределение интенсивности света, продифрагировавшего на структуре ФПУ.

Распределение интенсивности в отдельных дифракционных порядках описывается выражением

$$I_{2k}(x, y) = \Gamma (\pi r_x r_y / \lambda z)^2 \exp[-2(\pi r_x x / \lambda z)^2] \times \exp[-2(\pi r_y y / \lambda z)^2] |c_k|^2. \quad (10)$$

Для определения соотношения величин сигналов – исходного и создаваемого k -м порядком, необходимо проинтегрировать соотношения (2) и (10) по площадке единичной фотоприемной ячейки ФПУ с размерами $a_x \times a_y$:

$$I_1 = (1/a_x a_y) \int_{-0,5a_x}^{0,5a_x} \int_{-0,5a_y}^{0,5a_y} I_1(x, y) dx dy,$$

$$I_{2k} = (1/a_x a_y) \int_{-0,5a_x}^{0,5a_x} \int_{-0,5a_y}^{0,5a_y} I_{2k}(x, y) dx dy.$$

При этом отношение интенсивностей, выраженное в дБ и характеризующее “полный” динамический диапазон ФПУ, равняется

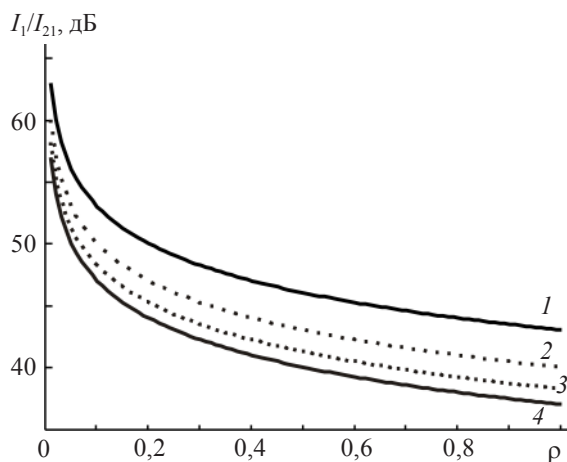


Рис. 6. Зависимости динамического диапазона от коэффициента отражения электродов топологической структуры ФПУ ($z = 2$ мм). 1 – $\Gamma = 0,05$, 2 – $\Gamma = 0,1$, 3 – $\Gamma = 0,15$, 4 – $\Gamma = 0,2$.

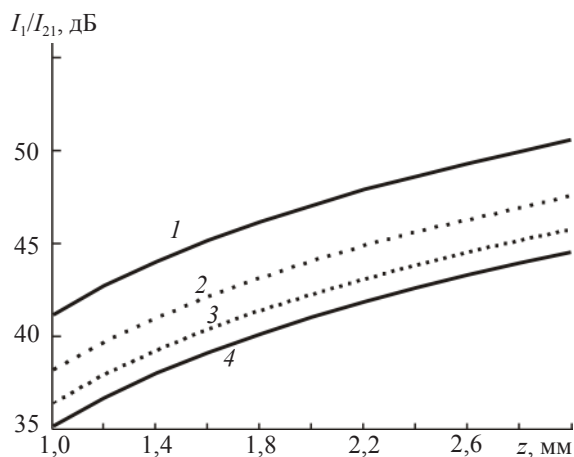


Рис. 7. Зависимости динамического диапазона от удвоенного расстояния между структурой и покрывным стеклом ФПУ ($\Gamma = 0,1$). 1 – $\rho = 0,2$, 2 – $\rho = 0,4$, 3 – $\rho = 0,6$, 4 – $\rho = 0,8$.

$$D_k = 10 \lg(I_1/I_{2k}). \quad (11)$$

На рис. 6 приведены зависимости отношения исходной интенсивности и интенсивности первого (как наиболее опасного) дифракционного порядка, т. е. величины D_1 от коэффициента отражения ρ

электродов топологической структуры ФПУ при различных Γ (размеры фоточувствительной ячейки полагались равными $a_x = a_y = 10$ мкм).

Зависимости D_1 от расстояния z , характеризующего положение ($z/2$) плоскости отражения от входного стекла ФПУ относительно фотоприемной области, при разных ρ и при $\Gamma = 0,1$, приведены на рис. 7.

Для получения точного значения D_1 необходимо знать технологические параметры (коэффициенты ρ и Γ) конкретного фотоприемника.

В качестве примера, рассчитаем D_1 для некоторой ПЗС линейки, обладающей следующими параметрами: $d = 15$ мкм, $h = 2$ мкм, $\rho = 0,5$, $\Gamma = 0,05$, $z = 2$ мм, при воздействии на чувствительную область ПЗС светового пучка с параметрами: $\lambda = 0,657$ мкм, $r_{0x} = 5$ мкм, $r_{0y} = 10$ мкм. В этом случае полный динамический диапазон D_1 такого ПЗС фотоприемника, согласно выражению (11), составит около 46 дБ.

В заключении можно указать наиболее простые меры, направленные на уменьшение рассмотренных выше дифракционных явлений. Первым и наиболее общим способом является снижение коэффициента отражения токопроводящих электродов, составляющих топологическую структуру и окружающих фоточувствительную область ПЗС линейки. Другим способом, в тех случаях, когда область применения фотоприемника предполагает использование достаточно узкой части оптического диапазона, является двустороннее просветление покровного окна ПЗС.

В случае, когда указанные меры недоступны, снизить нежелательные дифракционные эффекты позволит поворот ПЗС фотоприемника в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции, что позволит достичь величины полного ДД, превышающей 60 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роздобудько В.В., Пелипенко М.И. Быстродействующий измеритель параметров СВЧ радиосигналов // Специальная техника. 2006. № 1. С. 28–36.
2. <http://www.e2v.com>
3. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 364 с.