

06

Исследование функциональных свойств фоторезистора, питаемого переменным напряжением

© Б.Н. Денисов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск
E-mail: boris117@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2007 г.

Приведены результаты исследования функциональных свойств фоторезистора, питаемого переменным напряжением. Предложен метод Фурье анализа кинетики фотопроводимости с помощью переменного напряжения, приложенного к фоторезистору. Показана возможность перемножения фоторезистором двух сигналов, один из которых является электрическим, другой — оптическим, модулированным по интенсивности.

PACS: 85.60.Dw

Исследование кинетики фотопроводимости обычно проводится при периодическом освещении и питании фоторезистора постоянным напряжением [1]. Применение периодического освещения и питания позволяет значительно расширить возможности исследования параметров кинетики процессов фотопроводимости и практического применения фоторезистора в радиотехнике и оптоэлектронике. Рассмотрим фоторезистор с омическими контактами. Пусть интенсивность оптического сигнала изменяется по гармоническому закону:

$$\Phi = \Phi_m [1 + \cos(\Omega t)], \quad (1)$$

где Φ_m — постоянная составляющая интенсивности света, Ω — частота изменяющейся во времени интенсивности света, t — время.

Проводимость фоторезистора зависит от вида кинетики неравновесных свободных носителей и в самом общем случае может быть записана в виде ряда Фурье:

$$\sigma = \sigma_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k [1 + \cos(k\Omega t + \psi_k)], \quad (2)$$

где σ_0 — равновесная проводимость; σ_k — k -я гармоника неравновесной проводимости, которая является функцией неравновесной концентрации свободных носителей и вида кинетики фотопроводимости; $k\Omega$ — частота k -й гармоники; Ω — частота первой гармоники; ψ_k — фаза k -й гармоники. Подавая на фоторезистор переменное напряжение вида $U = U_m \cos \omega t$, получим выражение для тока на выходе фоторезистора:

$$I = I_n \cos \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k}{2} \cos[(\omega - k\Omega)t + \psi_k] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k}{2} \cos[(\omega + k\Omega)t + \psi_k], \quad (3)$$

где $I_n = (\sigma_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k) U_m S / l$, $I_k = \sigma_k U_m S / l$; ω — частота переменного напряжения; U_m — амплитуда переменного напряжения; S — площадь контактов; l — расстояние между контактами фоторезистора. При плавном изменении ω , в момент выполнения равенства $[(\omega - k\Omega)t + \psi_k] = 0$, на выходе фоторезистора появится постоянный ток, пропорциональный k -й гармонике проводимости, а следовательно, концентрации свободных носителей. Нами было проведено исследование гармоник в планарном фоторезисторе на основе беспримесного кремния (размером $2 \times 4 \times 1$ mm) с графитовыми контактами, удельное сопротивление которого составляло $\rho = 3000 \Omega \cdot \text{см}$. Схема установки для измерения гармоник приведена на рисунке. Фоторезистор I освещался с помощью ИК-светодиода 4 , питание которого осуществлялось униполярными импульсами напряжения ($f = 5$ kHz) от генератора 5 . Постоянная времени фоторезистора (τ) при низком уровне освещения равна $8 \mu\text{s}$. Для измерения амплитуд гармоник фототока переменное напряжение на фоторезистор подавалось от генератора 2 с малым коэффициентом нелинейных искажений (0.015%). Постоянный ток, который появлялся в цепи фоторезистора при совпадении частот гармоник с частотой генератора, регистрировался гальванометром 3 . Для моделирования кинетики и расчета спектра гармоник с помощью программы MathCad использовалось нормированное в единицах $2\gamma n_0$ дифференциальное уравнение изменения концентрации электронов в

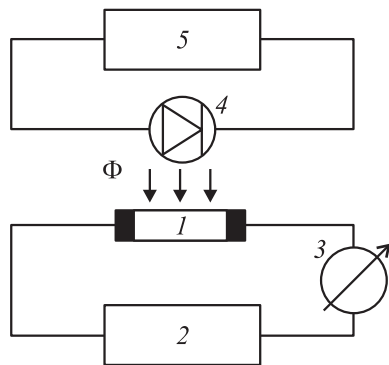


Схема анализатора спектра гармоник на основе фоторезистора: 1 — фоторезистор, 2 — генератор ГЗ-118, 3 — гальванометр М-95 с многопредельным шунтом, 4 — светодиод АЛ-107, 5 — генератор Гб-34.

зоне проводимости в собственном полупроводнике:

$$\frac{d\Delta n'}{dt'} = A'(1 + \cos \omega t)/2 - \Delta n' - \Delta n'^2/2, \quad (4)$$

где $\Delta n/n_0 = \Delta n'$ — относительная неравновесная концентрация; n_0, n — равновесная и неравновесная концентрации электронов в зоне проводимости соответственно; $\Delta n = n - n_0$; A' — относительная амплитуда скорости генерации свободных носителей; $dt' = dt/\tau$; $\tau = 1/2\gamma n_0$ — время жизни свободных носителей при низком уровне освещения, γ — коэффициент рекомбинации. A' рассчитывалась из (4) при $\cos \omega t = 0$, $d\Delta n'/dt' = 0$:

$$A' = [(\Delta n_s/n_0 + 1)^2 - 1]/2. \quad (5)$$

Величина $s = \Delta n_s/n_0$ задавалась экспериментально из соотношения $s = (I_s - I_t)/I_t$, где Δn_s — неравновесная стационарная концентрация; I_s, I_t — фототок при освещении и в темноте соответственно. В табл. 1 приведен нормированный спектр амплитуд гармоник (a_n), измеренных с помощью предложенного метода и анализатора спектра СК4-56. Там же приведены результаты расчета спектра гармоник из уравнения (4). Измерения и расчет проводились при уровне освещенности, соответствующей $s = 4$.

Из таблицы видно хорошее совпадение полученных результатов с помощью предложенного метода и анализатора спектра в пределах

Таблица 1.

k	a_n , а.е.					
	1	2	3	4	5	6
Эксперимент	1	0.04	0.3	0.03	0.17	0.022
СК4-56	1	0.04	0.3	0.03	0.17	0.022
Расчет	1	0.04	0.308	0.029	0.169	0.0223

точности используемых приборов. Следует отметить, что моделирование с помощью уравнения (4) достаточно точно описывает кинетику фотопроводимости. Предложенный метод спектрального анализа упрощает процесс измерения спектрального состава гармоник без снижения точности, а использование цифрового интегрирующего гальванометра значительно повысит точность. Применение переменного напряжения для питания фоторезистора позволяет проводить спектральный анализ гармоник модулированных по интенсивности оптических сигналов. Пусть интенсивность оптического сигнала изменяется по закону

$$\Phi = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k [1 + \cos(k\Omega t + \Psi_k)]. \quad (6)$$

В случае линейной кинетики и однородной генерации свободных носителей светом в объеме фотопроводника, омических контактов выражение для фототока при подаче переменного напряжения $U = U_m \cos \omega t$ будет иметь вид (3) при условии

$$2\pi/\tau \gg k\Omega. \quad (7)$$

При совпадении частоты переменного напряжения с частотой гармоники вплоть до k -й, на выходе фоторезистора будет появляться постоянный ток, пропорциональный гармоникам интенсивности модулированного оптического сигнала. Нами проведен эксперимент по спектральному анализу прямоугольных импульсов света (скважностью $g = 2$) с частотой следования импульсов 100 Hz. Измерения проводились с помощью фоторезистора, описанного выше, и экспериментальной установки, изображенной на рисунке. Данные измерения 9 гармоник, для которых выполнялось неравенство (7), приведены в табл. 2, где за единицу принята амплитуда первой гармоники.

Таблица 2.

k	a_n , а.е.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эксперимент	1	0	0.33	0	0.2	0	0.14	0	0.11
Расчет	1	0	0.333	0	0.2	0	0.143	0	0.111

Там же приведен спектральный состав меандра с $g = 2$, полученный в результате разложения в ряд Фурье. Вплоть до девятой гармоники в пределах точности прибора М-95 наблюдается совпадение. Следовательно, фоторезистор, питаемый переменным напряжением, может быть использован для спектрального анализа гармоник модулированного по интенсивности оптического сигнала.

Из выражения (3) следует, что фоторезистор является перемножителем двух сигналов, при этом один из сигналов является приложенным к фоторезистору напряжением, а второй — оптическим, преобразованным в изменение проводимости фоторезистора. Следовательно, на основе резисторного оптрона можно создавать радиотехнические устройства, в которых используется операция перемножения двух сигналов (смесители, синхронные детекторы и др.). Преимущество таких устройств заключается в идеальной гальванической развязке и отсутствии нелинейных искажений, связанных с операцией перемножения, что резко упрощает конструкцию таких устройств [2–4].

Список литературы

- [1] Астайкин А.И., Смирнов М.К. Основы оптоэлектроники. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001. 260 с.
- [2] Денисов Б.Н., Беглов В.И., Ницев К.Н., Турышев В.Н. Передатчик с амплитудной модуляцией. Патент № 39240, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02. Оpubл. 20.07.2004, бюл. № 20.
- [3] Денисов Б.Н., Беглов В.И., Ницев В.И. Анализатор спектра электрических сигналов. Патент № 36069, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02. Оpubл. 27.11.2006, бюл. № 33.
- [4] Денисов Б.Н., Беглов В.И., Бибанина Е.М. Фазовый модулятор. Патент № 36069, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02. Оpubл. 20.02.2004, бюл. № 5.