

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.376

БАЛАНСНЫЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ РЕЗИСТОРНОГО ОПТРОНА

© 2019 г. Б. Н. Денисов¹, Я. А. Зазулин¹, *¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Российская Федерация, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68

*E-mail: yaroslav.zazulin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2017 г.

После доработки 16.10.2017 г.

Принята к публикации 06.02.2018 г.

Показана возможность реализации амплитудного и балансного модулятора на основе резисторного оптрона без нелинейных искажений в спектре модулирующего сигнала. С помощью разработанного устройства обеспечено прямое перемножение оптических и электрических сигналов. Создан макет балансного модулятора и проведено математическое моделирование балансного модулятора.

DOI: 10.1134/S0033849419010054

Использование фоторезистора для управления электрическими сигналами с помощью оптических сигналов в ряде случаев дает значительные преимущества по сравнению с устройствами на основе транзисторов. Эти преимущества связаны с возможностью прямого перемножения оптических и электрических сигналов фоторезистором [1, 2]

$$I(\omega, \Omega, t) = \sigma(\omega, t)U(\Omega, t). \quad (1)$$

Следует отметить, что проблема прямого аналогового перемножения сигналов ни в ламповой, ни в транзисторной электронике до настоящего времени не решена. Умножение как в ламповой, так и в транзисторной электронике осуществляется опосредованно за счет возведения в квадрат суммы сигналов. Как было показано в [1], на основе резисторного оптрона возможна реализация прямого перемножения сигналов и создание большинства устройств аналоговой радиотехники. Идеальная гальваническая развязка, резкое упрощение конструкции радиотехнических устройств для перемножения сигналов, в ряде случаев практически полное отсутствие нелинейных искажений, делает резисторный оптрон перспективными аналоговым радиотехническим устройством. При этом возникает широкая возможность идеального перехода из оптических линий передачи информации к электрическим каналам систем обработки информации. По сути, резисторный оптрон может выполнять роль транзистора в системах оптоэлектронной обработки информации.

Цель данной работы — создать балансный модулятор (БМ) на основе резисторного оптрона.

В радиотехнике широко используются устройства балансной модуляции. Главное достоинство

такого вида модуляции — высокая эффективность передатчика. Однако конструкция устройства БМ для получения балансной модуляции, является достаточно сложной: он состоит из фазовращателя, двух устройств перемножения сигналов, сумматора [2].

Рассмотрим БМ на основе резисторного оптрона. Анализ проведен для случая однородной генерации носителей светом в объеме фоторезистора на основе полупроводника n -типа, омических контактов и линейной люксамперной характеристики светодиода. Пусть в качестве несущего сигнала выступает оптический сигнал, модулированный по интенсивности с частотой ω :

$$\Phi = \Phi_0(1 + \cos \omega t). \quad (2)$$

Модулирующим сигналом будем считать напряжение с частотой Ω , приложенное к фоторезистору. Для простоты рассмотрения примем его однональным:

$$U = U_0 + U_m \cos \Omega t. \quad (3)$$

Ток на выходе фоторезистора будет равен

$$I = I_0 + \Delta I_0 + \Delta I_0 \cos \omega t + I_{m0} \cos \Omega t + \Delta I_m \cos \Omega t + \Delta I_m \cos \omega t \cos \Omega t, \quad (4)$$

где $I_0 = \sigma_0 U_0$ — темновой ток при постоянном напряжении U_0 ; $\sigma_0 = en_0 \mu_n S / \ell$ — темновая проводимость фоторезистора; $\Delta I_0 = \Delta \sigma U_0$ — фототок при напряжении U_0 ; n_0 — равновесная концентрация основных носителей, $\Delta \sigma = \chi e a \beta \Phi_0 \tau_n \mu_n S / \ell$ — фотопроводимость при освещении интенсивностью Φ_0 ; τ_n, μ_n — время жизни и подвижность основных носителей, $\Delta I_m = \Delta \sigma U_m$ — фототок при напряже-

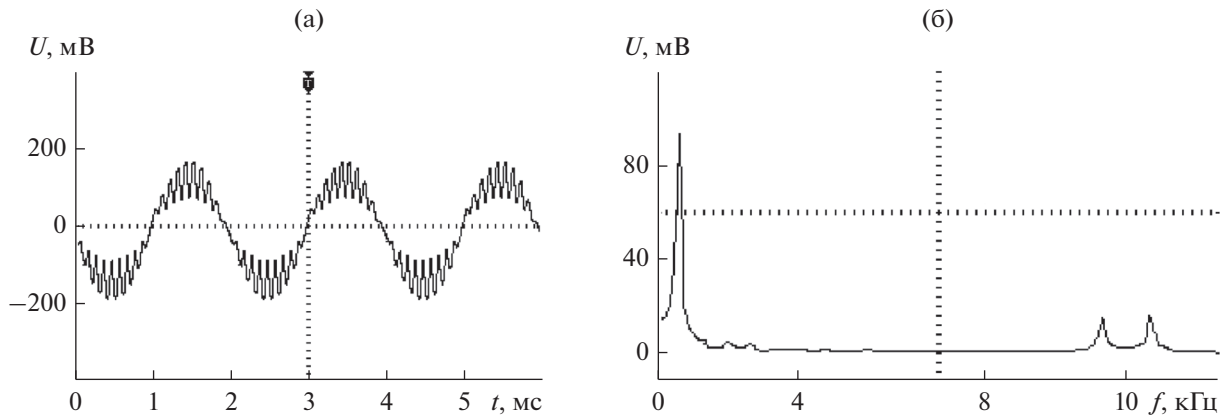


Рис. 1. Осциллограмма сигнала (а) и спектра сигнала (б) на выходе фоторезистора, $\omega/\Omega = 20$.

нии U_m ; $I_{m0} = \sigma_0 U_m$ — темновой ток при амплитуде переменного напряжения равного U_m ; S, l — площадь контактов и расстояние между контактами фоторезистора. Выражение (4) содержит амплитудно-модулированный (АМ) сигнал, имеющий вид

$$I_{AM} = \Delta I_0 \cos \omega t + \frac{\Delta I_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\Delta I_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t. \quad (5)$$

В данном случае глубина модуляции равна

$$M = \frac{\Delta I_m}{\Delta I_0} = \frac{U_m}{U_0}, \quad (6)$$

где U_m — амплитуда модулирующего сигнала; U_0 — постоянная составляющая напряжения модулирующего сигнала. Так как U_m может быть больше U_0 , следовательно, возможно получение перемодулированного колебания и балансно-модулированного колебания, если $U_0 = 0$. Нами была проведена экспериментальная проверка устройства БМ на основе фоторезистора. Нелинейные искажения сигнала, несущего информацию, в данном случае будут связаны только с устройством, преобразующим сообщения в электрический сигнал. Нелинейные искажения возникают только в несущем сигнале, и они связаны в основном с нелинейной кинетикой фотопроводимости. Более высокие гармоники несущего сигнала могут быть легко отфильтрованы фильтром, настроенным на частоту несущего колебания ω . Частота несущего сигнала в данном случае может достигать величины не более $1/\tau$, где τ — постоянная времени фоторезистора. Фоторезисторы на основе кремния (например, кремния с примесью индия Si(In)) могут иметь малое время релаксации. Согласно [2] в Si(In) при концентрации центров рекомбинации 10^{17} постоянная времени релаксации фотопроводимости равна 0.0001 мкс. Следовательно, в

данном случае частоты несущего сигнала могут достигать до 10 ГГц. Использование гармоник в спектре несущего сигнала за счет нелинейной кинетики, позволяет поднять несущую частоту на порядок.

Возможность получения балансно-модулированного колебания была проверена с помощью фоторезистора на основе чистого кремния. Омические контакты были изготовлены на основе графена. Частота несущего колебания (ω) равна 10 кГц, частота модулирующего колебания 500 Гц. На рис. 1 приведена осциллограмма (а) и спектр (б) фототока на выходе фоторезистора.

Для получения балансно-модулированного колебания необходимо удалить из спектра полученного колебания первую гармонику модулирующего сигнала. На рис. 2 приведена осциллограмма (а) и спектр (б) тока на выходе фильтра и осциллограмма балансно-модулированного колебания.

На рис. 3 приведены рассчитанные с помощью соотношения (4) виды сигнала на выходе фоторезистора до фильтра (а) и после фильтра (б).

Моделирование фильтра осуществлялось путем введения множителя равного коэффициенту передачи фильтра на данной частоте. Отношение несущей частоты к модулирующей частоте равно 20. Из рисунков видно хорошее совпадение рассчитанных и измеренных кривых.

Рассмотрим достоинства устройства для получения балансно-модулированных сигналов с помощью фоторезисторного оптрона: это — идеальная гальваническая развязка несущего и модулирующего колебаний, простота изготовления и настройки. В этом случае балансный модулятор состоит из трех простейших элементов: фоторезистора, светодиода и фильтра, и имеет низкий коэффициент нелинейных искажений (<1%). Исследование проводили с помощью измерителя нелинейных искажений типа С6-11. При наличии омических

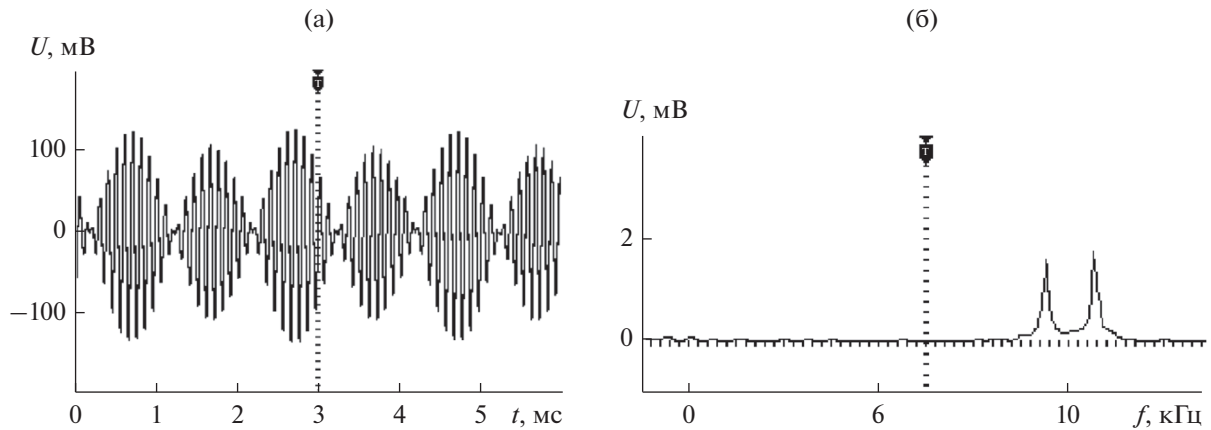


Рис. 2. Осциллограмма сигнала на выходе фильтра (а) и спектр сигнала (б).

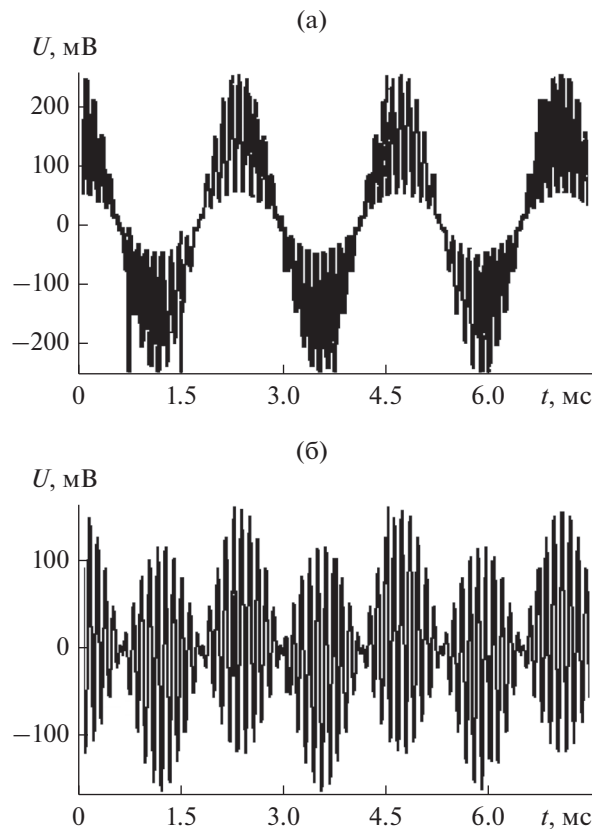


Рис. 3. Осциллограммы модулированного колебания на выходе фоторезистора (а) и фильтра (б) при $\omega/\Omega = 20$, рассчитанные с помощью соотношения (4); а – без учета постоянной составляющей тока, $\Delta\sigma/\sigma_0 = 2$, б – коэффициент передачи фильтра на частоте модуляции $\Omega = 500 \text{ Гц}$ равен 0.1.

контактов у фоторезистора получение АМ-колебаний не сопровождается нелинейными искажениями модулирующего сигнала. Все нелинейные искажения будут связаны только с устройством, преобразующим сообщение в электрический сигнал. Предложенная схема позволяет осуществ-

лять переход из оптических каналов связи в радиоканалы без дополнительных электронных устройств. Недостатком данного способа является то, что в настоящее время невозможно получить несущее колебание частотой свыше 10^{10} Гц , так как быстродействие лучших фоторезисторов составля-

ет 10^{10} с [2]. Разработка и создание резисторных оптронов с высокими параметрами по быстродействию и линейности позволят создать оптоэлектронные аналоги электронных устройств, в том числе и цифровых.

Отличительной особенностью таких устройств является исключительная простота изготовления и возможность создания полностью оптоэлектронных систем обработки информации. Транзи-

сторная электроника будет применяться только в процессах усиления сигналов.

Авторы благодарят В.В. Лосева (НИУ МИЭТ) за помощь в нанесении графеновых контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денисов Б.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 1.
2. *Каражанов С.Ж.* // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. № 8. С. 909.