

УДК 621.383

Коррекция амплитудно - частотной характеристики фотоприемного устройства в области высоких частот

Андреев Дмитрий Владимирович

dmitrii_andreev@bmstu.ru

Цирульников Илья Юрьевич

tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Объектом исследования является амплитудно-частотная характеристика фотоприемного устройства, способного регистрировать импульсы лазерного излучения наносекундной длительности в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн. Путем схемотехнического моделирования в системе автоматического проектирования NI Multisim 12.0 было проведено исследование зависимости амплитудно-частотной характеристики устройства от величины емкости цепи отрицательной обратной связи. Моделирование проведено для двух коэффициентов передачи: коэффициент передачи усилительной схемы без учета паразитного влияния фотодиода и коэффициент передачи усилительной схемы с учетом этого влияния.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, амплитудно-частотная характеристика, NI Multisim, схемотехническое моделирование

Фотоприемные устройства (ФПУ) предназначены для детектирования оптического сигнала, преобразования его в электрический и проведения последующего усиления, фильтрации и т. д. [1]. Исследуемое в настоящей работе ФПУ разработано для обнаружения сигналов в диапазоне видимого и инфракрасного излучения. При этом длительность импульсов лежит в пределах от 5 до 100 нс. Подобные результаты возможны благодаря использованию в качестве фотоприемника кремниевого фотодиода (ФД) со структурой $p-i-n$, обладающего быстродействием и линейностью достаточными для регистрации сигнала с подобными параметрами.

Учитывая особенности используемого ФД, заключающиеся в большой величине темнового тока, паразитного сопротивления и емкости, усилительная схема должна обеспечивать наибольшую возможную амплитуду выходного сигнала при минимально возможной величине шума. Уменьшение шумовой составляющей необходимо для улучшения порога чувствительности ФПУ.

В большей степени выполнение данных требований обеспечивается связкой входного каскада усилителя с ФД, для чего был выбран мал шумящий СВЧ транзистор типа 3П344Б. Это обусловлено тем, что по величине ток утечки затвора данного транзистора близок к темновому току ФД и не превышает его при малых входной и проходной емкостях. Также транзистор имеет крутизну характеристики не менее 15 мА/В коэффициент шума не более 1 дБ. Таким образом, 3П344Б обеспечивает достаточное усиление сигнала, поступающего с ФД, низкий уровень шума и согласование по шумам с расположенным далее преобразователем тока в напряжение, построенном

на основе биполярных транзисторов 2Т3191А91 и 2Т3187А91. Данная часть схемы позволяет уменьшить шунтирующее влияние паразитной емкости ФД для малых длительностей импульсов [2–5].

Для уменьшения входного сопротивления схемы, являющегося одним из источников шума ФПУ, применяется цепь отрицательной обратной связи (ООС), состоящая из резистора R6 и конденсатора C3. С ее помощью усилителя K определяется как отношение выходного напряжения ко входному току согласно формуле

$$K = I_{\text{вх}} Z_{\text{ООС}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}. \quad (1)$$

При увеличении сопротивления ООС $Z_{\text{ООС}}$ увеличивается K . Однако чрезмерный рост $Z_{\text{ООС}}$ приведет к увеличению входного сопротивления схемы и влияния паразитной емкости. Для изучения этого влияния и способов его компенсации необходимо построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ФПУ с последующим подбором параметров цепи ООС. С этой целью в САПР NI Multisim 12.0 была построена модель ФПУ с использованием аналогов электронных компонентов из встроенной библиотеки. ФД представлен схемой из импульсного источника тока I1, а его паразитное влияние учтено за счет конденсатора C_fd и резистора R_fd. 3П344Б заменен на виртуальный транзистор с параметрами, отредактированными для соответствия технической документации (VT1). 2Т3191А91 и 2Т3187А91 заменены на BFT92W (VT2) и BFR92W (VT3) соответственно [6].

Модель ФПУ, построенная в NI Multisim 12.0, представлена на рис. 1.

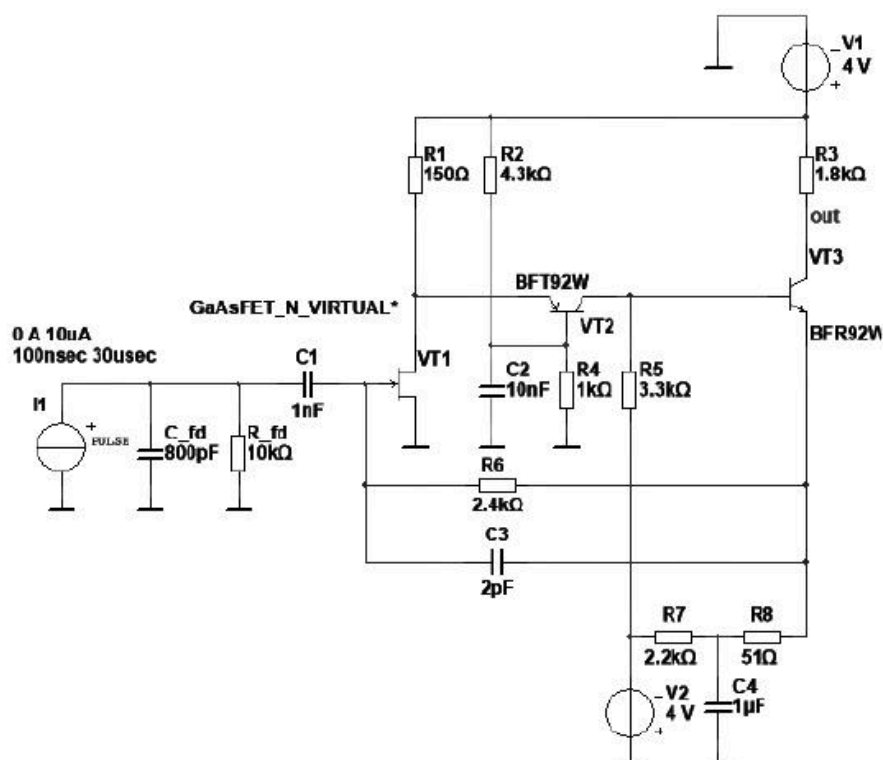


Рис. 1. Модель ФПУ, построенная в NI Multisim 12.0

Для проведения анализа были построены две АЧХ: для коэффициента передачи усилителя без учета паразитного влияния ФД (отношение выходного напряжения к ко входному току усилителя, поступающему на затвор VT1 с конденсатора C1) и для коэффициента передачи с учетом этого влияния (отношение выходного напряжения к ко входному току, всей схемы, поступающему с источника П1).

Результаты моделирования АЧХ представлены на рис. 2.

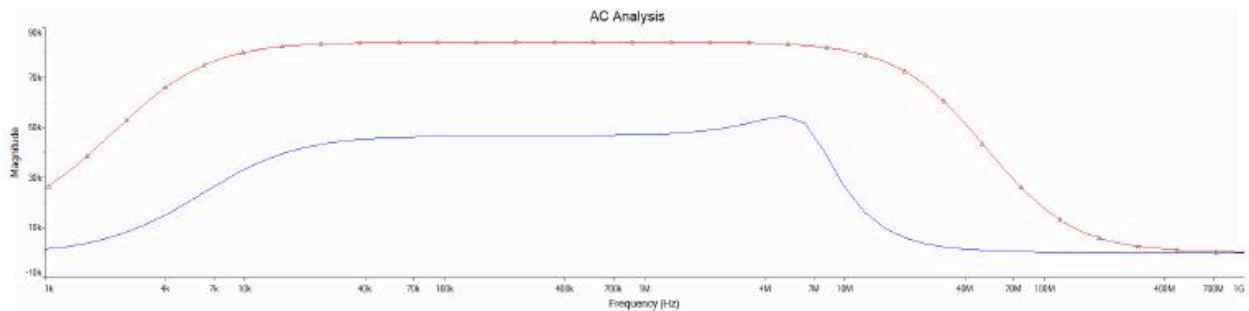


Рис. 2. АЧХ ФПУ

Верхний график соответствует АЧХ усилителя без учета ФД. Из него видно, что наибольший $K \approx 84$ кОм, нижняя граничная частота по уровню $0,7f_n \approx 3$ кГц, а верхняя граничная частота $f_v \approx 33$ МГц.

Нижний график соответствует АЧХ усилителя с учетом ФД. Из него видно, что в области высоких частот присутствует подъем. Следовательно, при повышении частоты принимаемой импульсной последовательности присутствует высокая вероятность возникновения колебаний выходного сигнала с последующей генерацией.

Для устранения подъема АЧХ необходимо провести коррекцию сопротивления цепи ООС в области высоких частот с сохранением величины K . Наиболее простым способом будет увеличение емкости конденсатора C3. Было выявлено, что оптимальная величина составляет 4,7 пФ.

Результаты моделирования АЧХ после корректировки емкости конденсатора C3 представлены на рис. 3.

Из верхнего графика видно, что K и f_n не изменились, а $f_v \approx 14$ МГц.

Из нижнего графика видно, что подъем в области высоких частот практически отсутствует и может считаться незначительным.

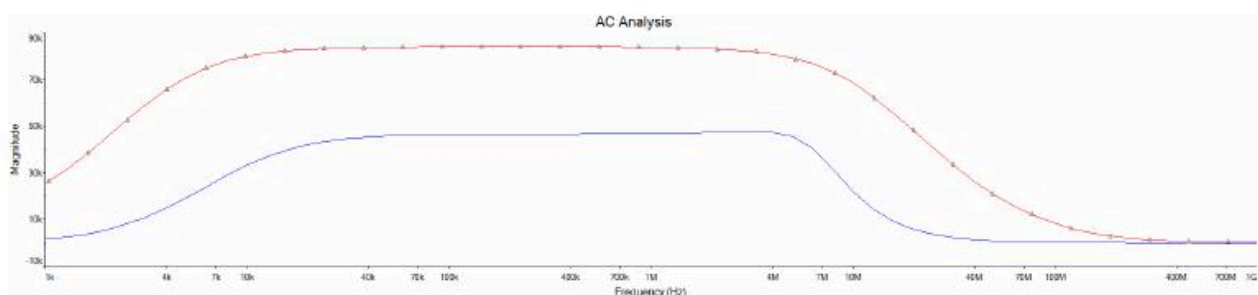


Рис. 3. АЧХ ФПУ после корректировки емкости конденсатора C3

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что корректировка АЧХ позволила повысить стабильность работы ФПУ в области высоких частот с сохранением величины K . Однако это также привело к ограничению полосы пропускания устройства.

В статье путем применения САПР NI Multisim 12.0 проведено исследование влияния изменения емкости конденсатора в цепи ООС на АЧХ ФПУ. Представленная схема обеспечивает стабильный коэффициент передачи в широкой полосе частот. Полученные результаты могут быть применимы для практических и учебных целей.

Литература

- [1] Трищенко М.А. *Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов*. Москва, Радио и связь, 1992, 400 с.
- [2] Степаненко И.П. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем*. Москва, Энергия, 1977, 672 с.
- [3] Andreev D.V., Andreev V.V., Konuhova M., Popov A.I. Technique of High-Field Electron Injection for Wafer-Level Testing of Gate Dielectrics of MIS Devices. *Technologies*, 2024, vol. 12, pp. 102 (1–10). <https://doi.org/10.3390/technologies12070102>
- [4] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 012041 (1–6). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/110/1/012041>
- [5] Schmidt W. Optimum choice of Si FET or GaAs FET as first stage active device for very low-noise optical receivers with medium bandwidth. *Electronic Letters*, vol. 19, no. 22.
- [6] Разевиг В.Д. *Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0*. Москва, Солон-Р, 2003, 704 с.

Correction of the amplitude - frequency response of a photodetector in the high frequency range

Andreev Dmitry Vladimirovich

dmitrii_andreev@bmstu.ru

Tsirulnikov Iliya Yurjevich

tsirulnikoviyu@student.bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

This research considers the amplitude-frequency response of the photodetector designed to register nanosecond laser pulses in the range of visible and infrared wavelength ranges. The study on the amplitude-frequency response of an amplifying circuit on the magnitude of the capacitance in a negative feedback circuit was conducted using circuit simulation in the CAD system NI Multisim 12.0. The simulation was performed for two transmission coefficients: the amplifying circuit without taking into account the parasitic influence of the photodiode and the transmission coefficient of the amplifying circuit taking into account this influence.

Keywords: photodetector, amplitude-frequency response, NI Multisim, circuit simulation