

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА С ОПТОВОЛОКОННОЙ РАЗВЯЗКОЙ

© 2019 г. Е. В. Смолина\*

*Институт лазерной физики СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б*

*\*e-mail: e.smolina@inbox.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2019 г.

После доработки 12.04.2019 г.

Принята к публикации 16.04.2019 г.

Описан быстродействующий преобразователь тока с оптоволоконной развязкой для регистрации ионного тока с измерительного электрода зонда Ленгмюра установки КИ-1 Института лазерной физики СО РАН, осуществляющий гальваническую развязку в условиях высокого уровня электромагнитных помех со стороны объемного заряда плазмы, а также инжекторов, энергетического и вакуумного оборудования. Для развязки предлагается использовать конструкцию, состоящую из пластикового оптического волокна  $\varnothing 1$  мм, передающего свет на длине волны 650 нм, быстрых светодиода IF-E91 и светодиода IF-D91. Сравниваются результаты лабораторных испытаний разработанного быстродействующего преобразователя и находящегося в эксплуатации на основе диодной оптопары АОД129А в условиях, близких к рабочим.

**DOI:** 10.1134/S0032816219050264

Быстродействующий преобразователь тока с оптоволоконной развязкой предназначен для исключения проникновения плавающего потенциала опорного электрода зонда Ленгмюра в сигнал тока зонда, т.е. для повышения точности определения концентрации и спектров электронов и ионов плазмы методом сравнения экспериментальной и модельной вольт-амперных характеристик зонда [1–3].

На установке КИ-1 [4–6] в Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН используются зонды Ленгмюра нескольких типов с преобразователем, выполненным на быстрой диодной оптопаре АОД129А. Особые условия, существующие на установке: переменные магнитные поля в плазме в широком диапазоне частот и амплитуд, поток мягкого рентгена в экспериментах с инжекцией электронного пучка, поток ультрафиолетового излучения в экспериментах с лазерной плазмой, а также высокий уровень электромагнитных помех со стороны коммутационного энергетического и электрического оборудования.

Концентрация заряженных частиц в ходе эксперимента меняется в широких пределах, что является причиной возникновения на измерительном электроде зонда Ленгмюра токовых сигналов. Минимально регистрируемое значение тока зонда – 0.1 мА, в предельном случае достигает 1.2 А.

Характерная длительность лазерного импульса составляет порядка 50 нс.

Используемые на настоящий момент оптрона интегральной компоновки, и в частности АОД129А, сконструированы так, что имеют проходную (барьерную) емкость порядка 1–2 пФ, через которую в канал тока проникает помеха, сравнимая по величине с основным сигналом, что затрудняет правильную интерпретацию зарегистрированных величин.

Кроме того, используя в эксперименте в качестве преобразователя оптрон и зная его коэффициент передачи по току, можно сделать выводы только о том, какая часть тока была передана с зонда Ленгмюра, не имея представлений о линейной или нелинейной характеристике самого сигнала.

Однако существенно возросшие требования к точности измерений ведут к необходимости улучшения метрологических характеристик прибора. Для этого в ИЛФ СО РАН был разработан быстродействующий преобразователь тока с оптоволоконной развязкой, упрощенная блок-схема которого приведена на рис. 1.

В конструкции преобразователя было предложено использовать пластиковое оптическое волокно  $\varnothing 1$  мм, переносящее свет 650 нм (Fiber Optic), интенсивность которого пропорциональна току зонда Ленгмюра. В качестве излучателя ис-

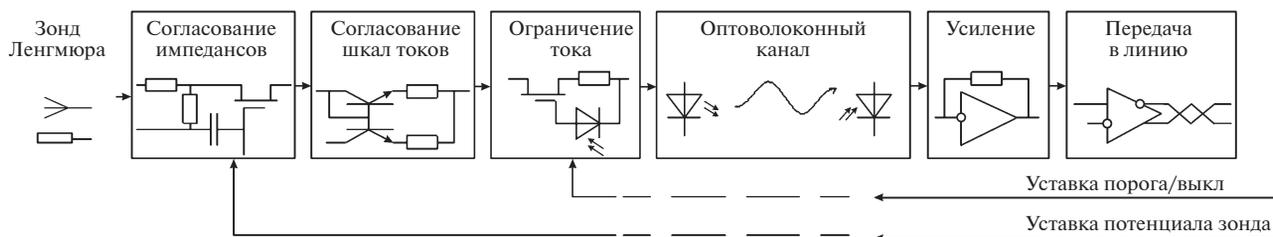


Рис. 1. Блок-схема преобразователя тока с оптоволоконной развязкой.

пользован светодиод IF-E91 (Fiber Optic), а в качестве приемника фотодиод IF-D91 (Fiber Optic).

Для обеспечения правильной и надежной работы оптического канала были введены новые узлы принципиальной схемы, реализующие следующие функции:

- согласование импедансов зонда, цепей передачи сигнала и цепей стабилизации потенциала зонда – каскад на мощном м.о.п.-транзисторе *p*-типа IRFR9310 (International Rectifier);
- согласование шкал максимального тока зонда и допустимого тока светодиода – каскад “токовое зеркало” на биполярных транзисторах повышенной линейности KSD1616A (ON Semiconductor);
- ограничение максимального тока зонда – каскад на мощном м.о.п.-транзисторе *n*-типа IRFR320 (International Rectifier);
- усиление сигнала тока фотоприемника трансимпедансным усилителем на быстром операционном усилителе ADA4817-1ARDZ (Analog Devices);
- выдача сигнала для регистрации в дифференциальную линию из витой пары.

Предполагалось, что замена интегрального оптрона на отдельные излучатель и фотоприемник позволит уменьшить барьерную емкость до любой необходимой величины, а также увеличить электрическую прочность барьера. В отличие от систем со стеклянными волокнами, данное решение должно обеспечить линейность, соотношение сигнал/шум на коротких расстояниях (при приемлемой стоимости), что даст возможность повысить быстродействие канала.

При разработке были учтены особые условия, существующие на установке. Устройство выполнено на многослойной печатной плате размером 100 × 40 мм с чистым зазором между проводниками с плавающим потенциалом и землей 10 мм. Номинальное напряжение питания 12 В, потребляемый ток до 50 мА. Длительность фронта переходной характеристики по уровням 0.1–0.9% составляет 15 нс.

С целью подтверждения соответствия характеристик преобразователя проектным были проведены испытания на стенде в условиях, близких к

реальным параметрам установки КИ-1, где потенциал на опорном электроде зонда Ленгмюра может достигать 1 кВ, а 500–600 В является типичным. Для этого был собран генератор импульсов с длительностью импульсов 1.2 мкс, амплитудой 600 В и длительностью фронта 15 нс.

Была смоделирована ситуация после воздействия лазерного излучения на мишень, когда созданная плазма только начинает расширяться и ее объемный заряд уже перезаряжает опорный электрод зонда и, соответственно, барьерную емкость оптрона, а тока, созданного ионами плазмы между электродами зонда Ленгмюра, еще нет. Сигнал, наблюдаемый на выходе устройства в этот момент, может быть обусловлен только проникновением помехи.

Такому же испытанию с таким же генератором ранее был подвергнут преобразователь, собранный с использованием оптрона АОД129А. На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы для обоих устройств, где видна помеха, амплитуду которой можно сравнить: на рис. 2 она эквивалентна 800 мА тока ионов, а на рис. 3 эквивалентна 6 мА, что примерно в 100 раз лучше. После установки заранее предусмотренных экранов 35 × 15 мм с двух сторон платы, помеха не видна на фоне шумов трансимпедансного усилителя фототока, т.е. проблема

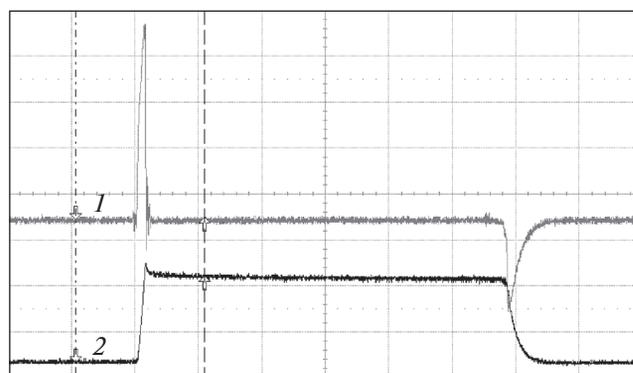
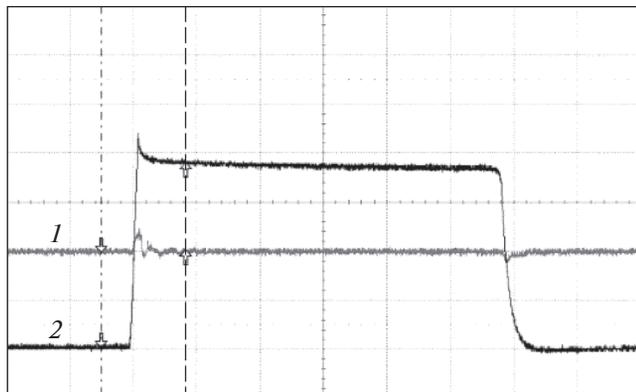


Рис. 2. Осциллограмма сигналов для преобразователя с оптроном АОД129А: 1 – амплитуда помехи 400 мВ (масштаб 100 мВ/клетка), эквивалентна 800 мА на входе, 2 – импульс с генератора (1 В/клетка).



**Рис. 3.** Осциллограмма сигналов для преобразователя с волоконно-оптической линией связи. 1 – амплитуда помехи 60 мВ (масштаб 200 мВ/клетка), эквивалентна 6 мА на входе, 2 – импульс с генератора (500 мВ/клетка).

проникновения помехи в канал тока полностью устранена. Тепловые шумы соответствуют расчетным и обеспечивают динамический диапазон 12 разрядов эффективных без перегрузки светодиода по току.

Таким образом, проведенные испытания показали, что вновь разработанный преобразователь соответствует проектным характеристикам и существенно превосходит предыдущую конструкцию, а именно: достигнуто ослабление помехи ниже порога чувствительности, расширена полоса пропускания, увеличен динамический диапазон,

улучшена линейность, введены устройства защиты от перегрузок.

В настоящий момент комплект готов к установке и будет использован при экспериментах с КИ-1.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 18-12-00080.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лебедев Ю.А.* Электрические зонды в плазме пониженного давления: уч.-метод. пособие. М.: Изд-во Московского ин-та нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, 2003. С. 4.
2. *Robert L.M.* // Amer. J. Phys. 2007. V. 75. № 20. P. 1078.
3. *Захаров Ю.П.* // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Т. 2. С. 463–466.
4. *Геворкян Л.Б., Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Солюхин Р.И., Шаламов С.П.* // Физическая газодинамика. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1976. С. 192–196.
5. *Пonomаренко А.Г., Антонов В.М., Мелехов А.В., Бояринцев Э.Л., Посух В.Г., Шайхисламов И.Ф.* Отчет по проекту П.8.1.4 Программы фундаментальных исследований СО РАН. Новосибирск: ИЛФ СО РАН, 2010. С. 32.
6. *Шайхисламов И.Ф.* Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. ИЛФ СО РАН, Новосибирск, 2014. С. 47–54.