

УДК 538.93

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА С ПОМОЩЬЮ ВРЕМЯПРОЛЕТНОЙ МЕТОДИКИ

А. Г. Витухновский, А. С. Шульга, С. А. Амброзевич<sup>1</sup>

*В работе предлагается новая схема экспериментальной установки для измерения подвижности носителей заряда в тонких пленках органических полупроводниковых веществ. Проведен анализ основных факторов, определяющих время экспоненциальной релаксации измерительной системы, на основании которого сделаны выводы о требуемых рабочих параметрах измерительного оборудования для максимального уменьшения времени релаксации. В соответствии с этим была разработана новая установка. Экспериментально показано качественное улучшение кинетических кривых тока для контрольного образца при использовании новой установки, позволяющее определять времена пролета и подвижность носителей заряда с высокой степенью достоверности.*

**Ключевые слова:** токоперенос, органические полупроводники, подвижность носителей.

Подвижность носителей заряда в органических полупроводниках является одним из ключевых параметров, который определяет возможность использования этого вещества для изготовления органических светоизлучающих диодов и транзисторов. Определение подвижности проводят с помощью нескольких методик. Использование эффекта Холла [1,2] для исследования органических веществ затруднено из-за незначительности эффекта. Поэтому для определения подвижности в таких материалах используют времяпролетную методику.

<sup>1</sup>s.ambrozevich@mail.ru

*Методика проведения эксперимента.* Для проведения эксперимента изготавливают образец, состоящий из пленки исследуемого органического вещества и нанесенных с двух сторон полупрозрачных электродов. К электродам прикладывают напряжение и один из них облучают коротким (менее 10 нс) импульсом лазера. Длину волны лазерного излучения подбирают такой, чтобы длина поглощения света была много меньше толщины пленки, т.е. чтобы поглощение происходило в области вблизи контакта. В результате поглощения света в исследуемом веществе возникают электронно-дырочные пары. Под действием электрического поля после облучения через образец проходит ток. По положению точки перегиба временной зависимости тока в двойных логарифмических координатах определяют время пролета. Оно соответствует прохождению центра пакета исследуемых носителей через второй электрод. Подвижность носителей заряда определяют как

$$\mu = \frac{d^2}{U t_{tr}}, \quad (1)$$

где  $t_{tr}$  – время пролета,  $U$  – напряжение смещения образца,  $d$  – толщина образца.

К основным трудностям описываемой методики можно отнести сложность измерения малых величин фототока, связанных с малой концентрацией носителей в органических полупроводниках, а также необходимость учитывать релаксации тока, связанные с емкостью измерительной части и входным сопротивлением амперметра.

*Измерительная установка.* Экспериментальная установка была создана на основе системы, описанной в работе [3]. Описанная в [3] схема обладала несколькими недостатками – в ней использован только один источник оптического возбуждения с длиной волны 337 нм (азотный лазер). Это позволяет проводить измерения только для весьма ограниченного класса веществ, длина поглощения света которыми не превышает 100 нм. Отсутствие специальных средств усиления тока и использование только осциллографа позволяют достоверно регистрировать токи, начиная с 10 нА, что не давало возможности измерять подвижность носителей заряда ниже границы порядка  $10^{-7}$  см<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup> (см. ниже соотношения между сопротивлением и подвижностью).

При создании новой установки авторы исходили из условия минимальности времени экспоненциальной релаксации тока  $t_{RC}$ , обусловленной аппаратной частью, которое является критическим параметром системы и определяет верхнюю границу измеряемой подвижности. Для построения новой системы были проанализированы факторы, определяющие  $t_{RC}$ , и была получена зависимость  $t_{RC}$  от характеристик измерительного оборудования.

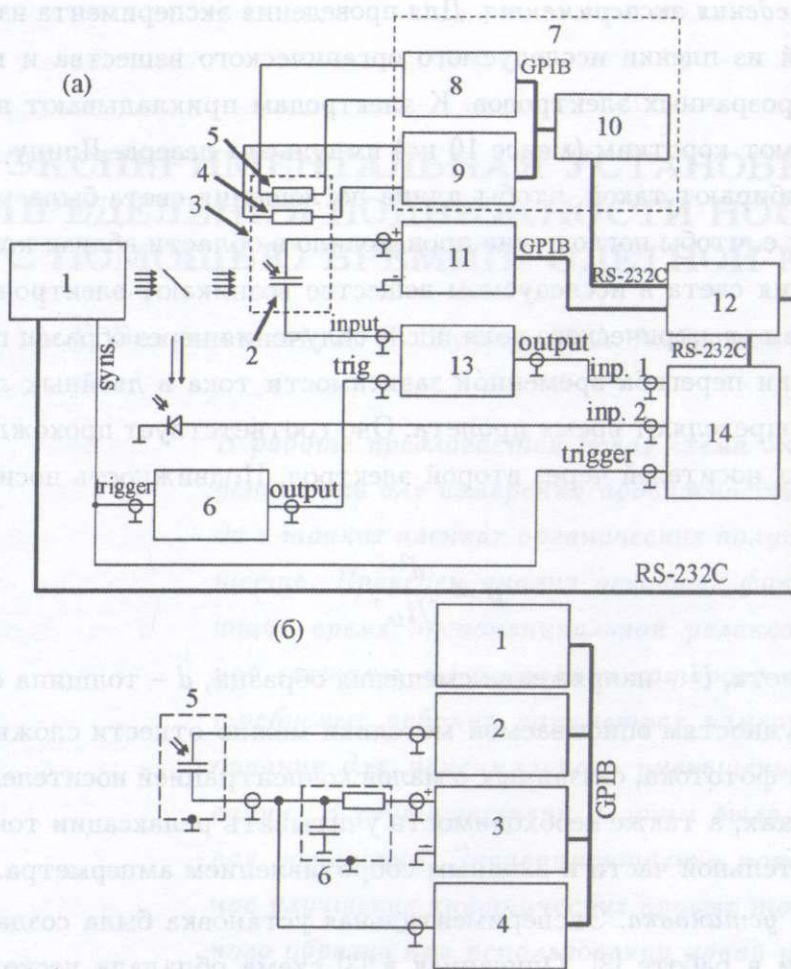


Рис. 1. (а) Схема установки для проведения времяпролетного эксперимента. Обозначения: 1 – YAG лазер Lotis ТП LS-2134UTF, 2 – образец, 3 – вакуумный термостат, 4 – нагреватель, 5 – термометр сопротивления, 6 – генератор Г5-56 (задержка), 7 – система термостатирования, 8 – вольтметр В7-46, 9 – блок питания PPS-2017, 10 – компьютер i386, 11 – блок питания PPS-2019, 12 – компьютер Pentium, 13 – усилитель тока SRS 570, 14 – осциллограф GDS-840, GPIB и RS-232C – интерфейсы. (б) Схема установки для измерения вольт-амперных характеристик для определения максимальных рабочих напряжений образцов. Обозначения: 1 – компьютер Pentium, 2 – амперметр Keithley 6485, 3 – блок питания PPS-2019, 4 – вольтметр HP 34401A, 5 – образец, 6 – фильтр.

Временная зависимость тока содержит переходный процесс перезарядки емкости  $C$  образца через сопротивление амперметра  $R_A$ . Времяпролетная методика предполагает, что время релаксации  $t_{RC} = R_A C$  меньше, чем время пролета  $t_{tr}$ . При измерении тока

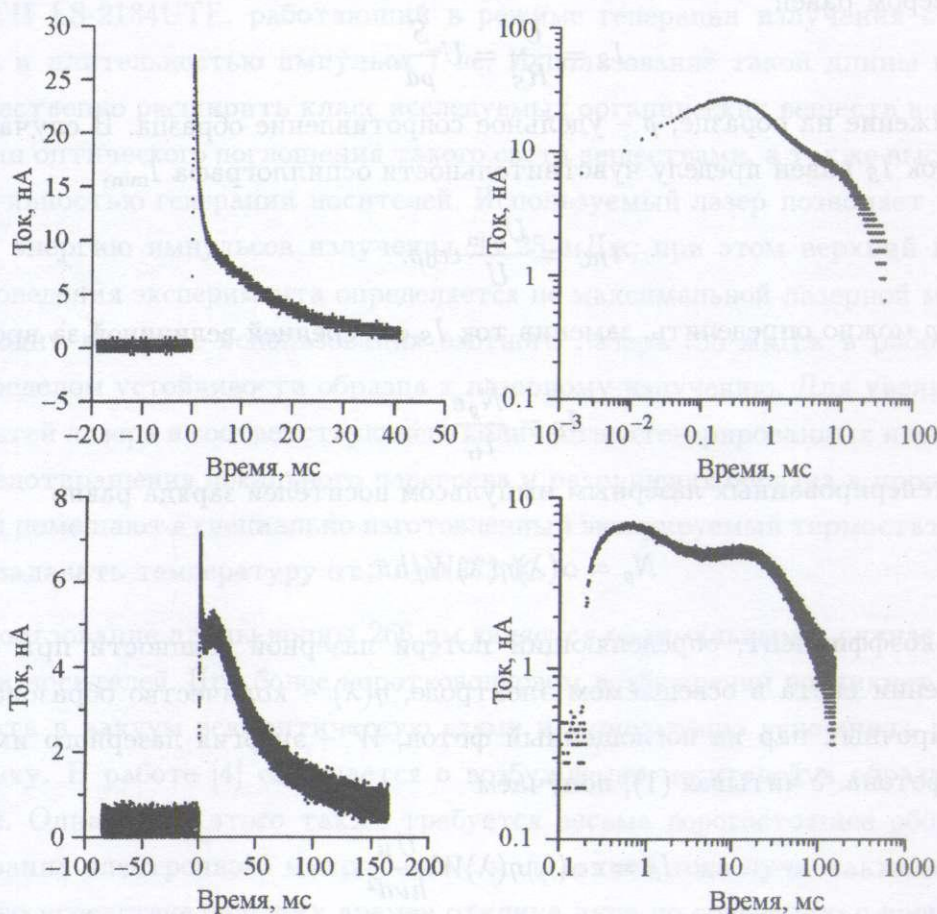


Рис. 2. Времяпролетные кривые тока, полученные в работе [3] для пленки чистого поливинилкарбазола при исследовании дырочной подвижности (сверху), и результаты, полученные на аналогичном образце при использовании описанной в настоящей работе установки в режиме задержанного запуска усилителя (внизу). Слева показаны кинетические кривые тока в линейном масштабе, справа – в двойном логарифмическом. На нижних рисунках четко наблюдается пик тока, связанный с приходом дырок к отрицательному электроду. Начальный участок роста тока на нижнем правом рисунке связан с переходными процессами в усилителе.

осциллографом время релаксации равно

$$t_{RC} = \frac{U_{\min}}{I_{\min}} \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}. \tag{2}$$

Здесь  $S$  и  $d$  – площадь контактов и толщина образца,  $R_A = \frac{U_{\min}}{I_{\min}}$ ,  $U_{\min}$  – разрешаемое осциллографом напряжение,  $I_{\min}$  – разрешаемый ток. Ток через образец в момент

облучения лазером равен

$$I_S = \frac{U}{R_S} = U \frac{S}{\rho d}, \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение на образце,  $\rho$  – удельное сопротивление образца. В случае, когда измеряемый ток  $I_S$  равен пределу чувствительности осциллографа  $I_{\min}$ ,

$$t_{RC} = \frac{U_{\min}}{U} \epsilon \epsilon_0 \rho. \quad (4)$$

Величину  $\rho$  можно определить, заменив ток  $I_S$  его средней величиной за время пролета:

$$I_S = \frac{N_g e}{t_{tr}}.$$

Количество сгенерированных лазерным импульсом носителей заряда равно

$$N_g = \alpha(\lambda) \eta(\lambda) W / h\nu;$$

здесь  $\alpha(\lambda)$  – коэффициент, определяющий потери лазерной мощности при отражении и поглощении света в освещаемом электроде,  $\eta(\lambda)$  – количество образовавшихся электронно-дырочных пар на поглощенный фотон,  $W$  – энергия лазерного импульса,  $h\nu$  – энергия фотона. Учитывая (1), получаем

$$I_S = e \alpha(\lambda) \eta(\lambda) W \frac{U \mu}{h\nu d^2}.$$

Используя (3), находим выражение для  $\rho$ :

$$\rho = \frac{d \cdot h\nu}{e \alpha(\lambda) \eta(\lambda) W \mu}.$$

Подставляя в (4), получаем

$$t_{RC} = \frac{U_{\min}}{U} \epsilon \epsilon_0 \frac{d \cdot h\nu}{e \alpha(\lambda) \eta(\lambda) W \mu}.$$

Таким образом, время экспоненциальной релаксации определяется толщиной образца  $d$ , чувствительностью измеряющего ток осциллографа  $U_{\min}$ , характеристиками лазерного излучения  $\eta(\lambda)$  и  $W$ , а также потерями мощности  $\alpha(\lambda)$ . Для уменьшения  $t_{RC}$  необходимо увеличивать энергию лазера, эффективность генерации носителей, и повышать чувствительность осциллографа.

Схема новой измерительной установки, созданной с учетом этих требований, приведена на рис. 1(а). Для оптического возбуждения использован импульсный YAG лазер

Lotis ТП LS-2134UTF, работающий в режиме генерации излучения с длиной волны 266 нм и длительностью импульса 7 нс. Использование такой длины волны позволяет существенно расширить класс исследуемых органических веществ в связи с малыми длинами оптического поглощения такого света веществами, а также высокой квантовой эффективностью генерации носителей. Используемый лазер позволяет плавно регулировать энергию импульсов излучения до 25 мДж; при этом верхний предел энергии для проведения эксперимента определяется не максимальной лазерной мощностью, как происходит в случае использования азотного лазера (35 мкДж в работе [3]), а задается пределом устойчивости образца к лазерному излучению. Для увеличения рабочих мощностей лазера и соответствующего количества сгенерированных носителей, а также для предотвращения локального перегрева и разрушения образца в процессе измерения образец помещают в специально изготовленный эвакуируемый термостат, позволяющий также задавать температуру от 77 до 373 К.

Использование длины волны 266 нм является оптимальным в случае оптической генерации носителей. При более коротковолновом возбуждении возникнет необходимость помещать в вакуум всю оптическую схему и существенно усложнить измерительную установку. В работе [4] сообщается о возбуждении носителей в образце электронной пушкой. Однако для этого также требуется весьма дорогостоящее оборудование. Использование электронного микроскопа с модуляцией тока луча также может быть затруднено вследствие больших времен отклика луча по сравнению с временем лазерной генерации, а также из-за возможного загрязнения рабочих объемов микроскопа органическими веществами, имеющими высокое давление насыщенных паров.

Для измерения тока был выбран осциллограф GW-Instek GDS-840 и усилитель SRS 570. При измерении тока с помощью осциллографа на образце с емкостью  $C = 0.5$  нФ при напряжении смещения  $U = 10$  В и входном сопротивлении осциллографа  $R_A = 1$  МОм время экспоненциальной релаксации составляет  $t_{RC} = R_A C = 5 \cdot 10^{-4}$  с. При этом минимальное регистрируемое напряжение осциллографа составляет  $U_{\min} = 10^{-3}$  В; минимальный регистрируемый ток  $I_{\min} = 10^{-9}$  А. В случае использования усилителя на пределе чувствительности  $G = 10^{-8}$  А/В его полоса пропускания составляет 2 кГц, что также соответствует времени отклика  $t_{\text{ампл}} = 5 \cdot 10^{-4}$  с, но при этом минимальный регистрируемый ток системы усилитель-осциллограф равен  $I_{\min} = U_{\min} G = 10^{-11}$  А. Входное сопротивление усилителя составляет  $R_{\text{инп}} = 10^4$  Ом, и соответствующее время  $RC$ -релаксации в цепи образец-усилитель равно  $t_{RC} = R_{\text{инп}} C = 10^{-5}$  с, что заведомо меньше времени отклика  $t_{\text{ампл}}$  усилителя. Это позволяет измерять времена пролета

при рабочих токах менее 1 нА, а также уменьшать плотность мощности возбуждающего излучения, предотвращая преждевременное разрушение образца и его локальный нагрев.

При создании установки возникли проблемы, связанные с измерением малых токов при высоком уровне импульсных помех от YAG лазера. Использование полной гальванической развязки лазера от измерительной системы, введение экранов, двух различных контуров заземления и двух независимых электрических сетей для питания лазера и измерительной части тем не менее позволило полностью подавить влияние помех на регистрируемый сигнал. Из двух лучших промышленных усилителей – Keithley 428 и SRS 570, имеющих практически одинаковые характеристики, был выбран последний, поскольку возможность питания от внутренних аккумуляторов, предусмотренная в SRS 570, позволяет полностью подавить влияние помех со стороны электрической сети.

Проблема, связанная с насыщением усилителя и появлением искажений сигнала при измерении большого по амплитуде участка экспоненциальной релаксации тока, была решена задержкой запуска усилителя и измерением лишь информативного участка кривой тока (рис. 2). Это позволяет достоверно определить время пролета пакета носителей, и при этом нет необходимости в дальнейшем увеличении чувствительности системы. Однако использование такого режима не дает возможности найти полный оптически сгенерированный заряд, оценить эффективность генерации носителей и обнаружить их захват на ловушках в случае, когда искусственное внедрение ловушек не изменяет время пролета [3].

Все измерительное оборудование подключено к компьютеру с помощью интерфейсов RS-232C и GPIB; это позволяет управлять экспериментом в полуавтоматическом режиме и сохранять результаты измерений.

В установке предусмотрена возможность проведения измерений вольт-амперных характеристик темновых токов, начиная от  $10^{-14}$  А, для определения границы диапазона рабочих напряжений образцов с помощью пикоамперметра Keithley 6485 (см. рис. 1(б)). Эта часть системы полностью автоматизирована и не требует присутствия оператора.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, *Справочник по физике* (М., Наука, 1968).
- [2] N. W. Askroft, N. D. Mermin, *Solid state physics* (Harcourt, 1976).
- [3] S. Ambrozevich et al., *Journal of Russian Laser Research* **29**(6), 526 (2008).
- [4] A. P. Tytnev et al., *Journal of Physics: Condensed Matter* **18**, 6365 (2006).

Поступила в редакцию 30 июня 2009 г.