

## НАБЛЮДЕНИЕ НЕОБЫЧНОЙ ДЛИННОЙ КОМПОНЕНТЫ В ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ СИГНАЛЕ ДВУХФАЗНОГО ДЕТЕКТОРА В АРГОНЕ

© 2020 г. А. Бондарь<sup>1),2)</sup>, Е. Борисова<sup>1),2)</sup>, А. Бузулуцков<sup>1),2)\*</sup>,  
В. Олейников<sup>1),2)</sup>, А. Соколов<sup>1),2)</sup>, Е. Фролов<sup>1),2)\*\*</sup>

Поступила в редакцию 26.04.2020 г.; после доработки 26.04.2020 г.; принята к публикации 26.04.2020 г.

Пропорциональная электролюминесценция (ЭЛ) в благородных газах используется в двухфазных детекторах по поиску темной материи для регистрации ионизационных сигналов в газовой фазе, вызванных рассеянием частицы в жидкой фазе (S2-сигналы). В настоящей работе были систематически изучены временные характеристики ЭЛ сигналов в двухфазном аргоновом детекторе как в широком диапазоне удельных электрических полей, от 3 до 9 Тд, так и для различных способов оптического считывания в разных спектральных диапазонах: используя криогенные ФЭУ и Si-ФЭУ, со сместителем спектра и без него, в вакуумном ультрафиолете и видимом диапазоне. При этом наблюдались как быстрая, так и медленные компоненты сигналов. В настоящей работе описывается наблюдение необычной длинной компоненты S2-сигнала с постоянной времени около 40 мкс. Особенности этой компоненты является то, что ее постоянная времени увеличивается с ростом электрического поля, и то, что она не может быть объяснена известными механизмами сцинтилляций. Мы также показали, что быстрая компонента может быть использована для измерения толщины ЭЛ зазора с суб-мм точностью. Полученные результаты могут иметь практические применения в эксперименте DarkSide по поиску темной материи.

DOI: 10.31857/S0044002720060070

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные детекторы с электролюминесцентным (ЭЛ) зазором в Ar или Xe актуальны для прямых поисков частиц темной материи [1–3]. В этих детекторах регистрируются первичная сцинтилляция (S1-сигнал) и первичная ионизация (S2-сигнал), образованные при взаимодействии частицы с жидкой мишенью. S2-сигнал регистрируется при помощи эффекта пропорциональной электролюминесценции (вторичной сцинтилляции) [4, 5] в ЭЛ зазоре, расположенном непосредственно над поверхностью жидкости.

Понимание формы S2-сигналов необходимо для корректного анализа и интерпретации данных. Это особенно важно для поиска ВИМПов малой массы на основе анализа событий типа “S2 only”, где используются только S2-сигналы [6]. Есть несколько мотиваций для детального изучения формы S2-сигналов в широком диапазоне электрических полей:

- Для определения правильных границ интегрирования по времени при вычислении полной амплитуды S2-сигнала.
- По размытию S2-сигнала, связанному с диффузией первичной ионизации в жидкости, можно измерить z-координату события [7].
- Длительность S2-сигнала соответствует времени дрейфа через ЭЛ зазор, что может быть использовано для измерения толщины ЭЛ зазора и мониторинга уровня жидкости и возможного прогибания электродов.
- Как дополнительный способ изучения механизмов ЭЛ.

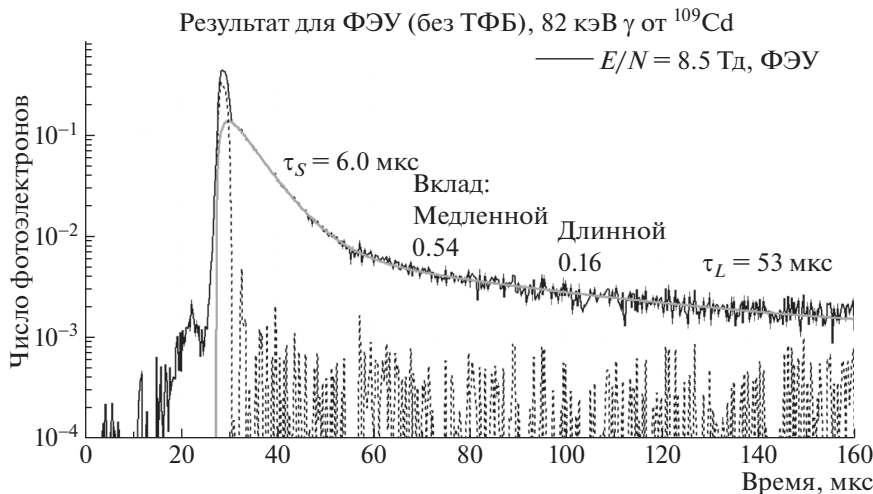
В нашей лаборатории было разработано несколько версий двухфазного детектора для изучения механизмов ЭЛ в чистом аргоне [8, 9] и в аргоне с добавкой азота [5, 10]: со считыванием матрицей Si-ФЭУ напрямую [11] или с использованием комбинированного умножителя ТГЭУ/Si-ФЭУ-матрица [11–13]. Также были проведены измерения ионизационных выходов в жидком аргоне [14]. В настоящей работе мы использовали

<sup>1)</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

<sup>2)</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

\*E-mail: A.F.Buzulutskov@inp.nsk.su

\*\*E-mail: geffdroid@gmail.com



**Рис. 1.** Форма S2-сигнала в логарифмическом масштабе для 82 кэВ гамма-квантов, зарегистрированная на четырех ФЭУ, в детекторе без сместителя спектра при максимальном удельном поле в ЭЛ зазоре 8.5 Тд. Сплошной линией показано аппроксимирование медленной и длинной компонент в соответствии с формулой (1). Штриховая линия показывает быструю компоненту, полученную вычитанием аппроксимированных медленной и длинной компонент из первоначального сигнала.

две версии детектора с оптическим считыванием на ФЭУ и на матрицу Si-ФЭУ.

В первой версии мы не использовали сместитель спектра, т.е. ФЭУ и Si-ФЭУ не были чувствительны к ВУФ излучению аргона в районе 128 нм. Во второй версии сместитель спектра на основе пленки тетрафенил-бутадиена (ТФБ) был нанесен на пластину перед тремя из четырех ФЭУ, использовавшихся в нашей установке. При этом Si-ФЭУ по прежнему оставались нечувствительными к вакуумному ультрафиолету ввиду специфической геометрии детектора.

Формы S2-сигналов были получены гистограммированием фотоэлектронных пиков во всех отображенных событиях для каждого канала регистрации, т.е. проводилось усреднение по всем отображенным событиям. Детально экспериментальная установка и процедура анализа описаны в [15].

В результате измерений мы изучили форму сигналов электролюминесценции (S2) в аргоне для устройств с различной спектральной чувствительностью в широком диапазоне электрических полей, от 3.4 до 8.5 Тд (1 Тд =  $10^{-17}$  В см<sup>2</sup>, что соответствует 0.87 кВ/см в газообразном аргоне при 87.3 К). Мы наблюдали быструю и две медленных компоненты в дополнение к стандартной компоненте, соответствующей излучению триплетного состояния эксимера на 128 нм с постоянной времени 3.1 мкс [5]. В настоящей работе мы обсуждаем свойства одной из этих медленных компонент с характерным временем спада около 40 мкс, которую мы в дальнейшем называем длинной компонентой. Кроме того, мы также демонстрируем,

что длительность быстрой компоненты может быть использована для измерения толщины ЭЛ зазора.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример формы S2-сигнала, полученной в установке без сместителя спектра от источника гамма-квантов с энергией 82 кэВ от  $^{109}\text{Cd}$  [16], приведен на рис. 1. Из-за особенностей триггера в нашем эксперименте форма быстрой компоненты была искажена. В связи с этим мы аппроксимируем медленную и длинную компоненту в области сигнала после быстрой компоненты (>31 мкс на рис. 1) следующей формулой, отражающей экспоненциальное падение этих компонент:

$$f(t) = y_0 + A_{S,L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_r}\right) \right] \times \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_{S,L}}\right), \quad (1)$$

где  $y_0$  — это базовая линия,  $A_{S,L}$  — амплитуды медленной и длинной компоненты,  $\tau_r$  — параметр времени нарастания медленной и длинной компоненты,  $\tau_{S,L}$  — их постоянные времени, и  $t_0$  определяет положение сигнала. Данная формула описывает форму S2-сигнала как для установки без, так и для установки со сместителем спектра. В случае сигнала с переизлучателем стандартная триплетная компонента уже входит в медленную компоненту, см. [15]. Мы также определяем вклад каждой компоненты как отношение ее площади к полной площади сигнала. При аппроксимации параметры  $\tau_{S,L}$  являлись свободными, а параметры  $\tau_r$  и  $t_0$  — фиксированными.

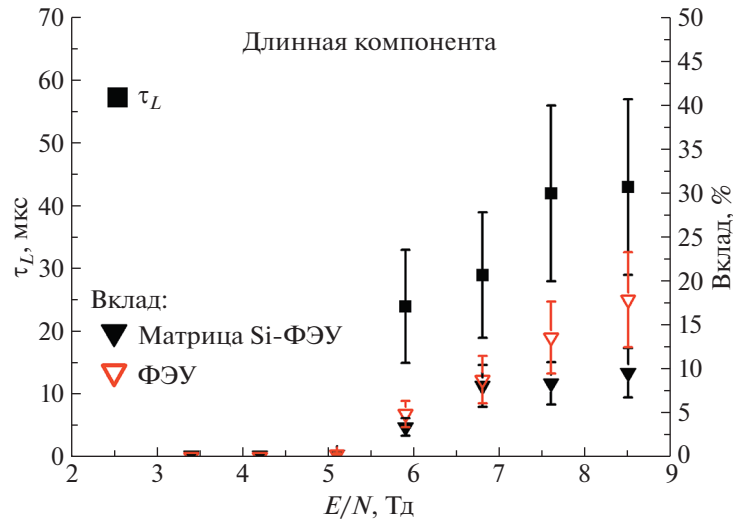


Рис. 2. Зависимость постоянной времени длинной компоненты  $\tau_L$  и ее вклада в S2-сигнал от удельного электрического поля в ЭЛ зазоре в установке без сместителя спектра.  $\tau_L$  показано как среднее между матрицей Si-ФЭУ и четырьмя ФЭУ.

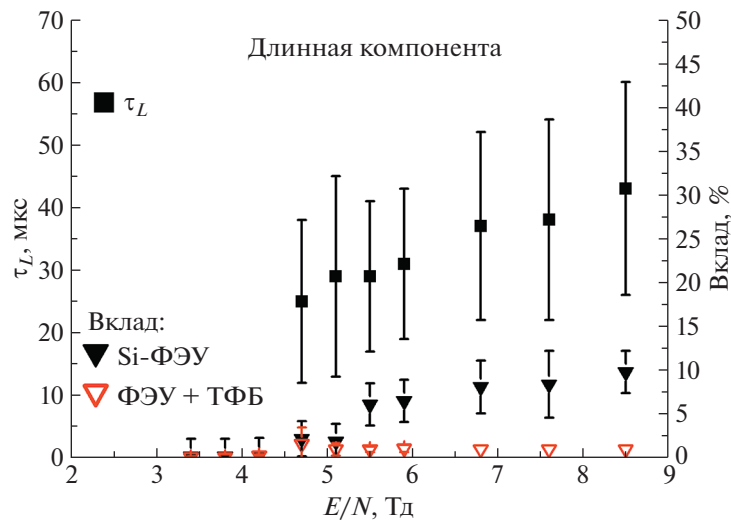
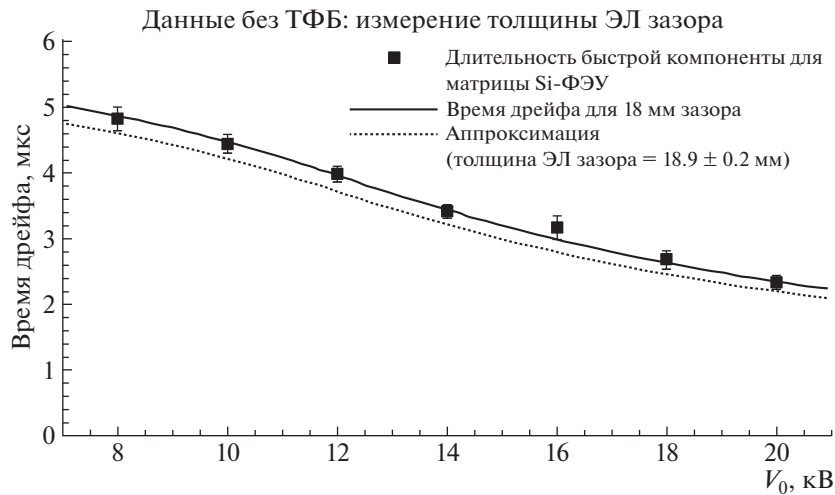


Рис. 3. Зависимость постоянной времени длинной компоненты  $\tau_L$  и ее вклада в S2-сигнал от удельного электрического поля в ЭЛ зазоре в установке со сместителем спектра на основе ТФБ.  $\tau_L$  показано как среднее между матрицей Si-ФЭУ и тремя ФЭУ, перед которыми была нанесена пленка сместителя спектра.

Полученная зависимость  $\tau_L$  и вклада длинной компоненты от поля в ЭЛ зазоре для детектора без сместителя спектра показана на рис. 2. Так как  $\tau_L$  для матрицы Si-ФЭУ и четырех ФЭУ согласуются в пределах их ошибок, на рисунке приведено их среднее. Основной неопределенностью как постоянной времени, так и вклада являются систематические ошибки, а именно, ошибка, связанная с числом бинов, ошибка, связанная с отбором событий и, наконец, ошибка, связанная с методом, диапазоном и фиксированными параметрами аппроксимации. Все три типа систематических ошибок оценивались для каждого значения поля и спо-

соба считывания; они оказались приблизительно равными.

Аналогичные зависимости, полученные для версии детектора, в которой сместитель спектра был нанесен перед тремя из четырех ФЭУ, приведены на рис. 3. Из сравнения рис. 2 и 3 можно сделать несколько выводов. Во-первых, наличие сместителя спектра не влияет на  $\tau_L$ . Во-вторых, учитывая, что ошибки являются систематическими,  $\tau_L$  растет с ростом электрического поля. Наконец, если сравнивать данные по ФЭУ, то видно, что добавление сместителя спектра уменьшает вклад длинной компоненты на ФЭУ на порядок (с 18 до 1% при 8.5 Тд). Также то, что вклад длинной



**Рис. 4.** Точками показана длительность быстрой компоненты (ширина на полувысоте) для матрицы Si-ФЭУ как функция высокого напряжения  $V_0$ , задающего ЭЛ поле. Данные приведены для версии детектора без сместителя спектра. Кривые: штриховая — время дрейфа для расчетной толщины ЭЛ зазора в 18 мм, сплошная — лучшая аппроксимация данных, где свободным параметром является толщина ЭЛ зазора.

компоненты не изменяется для Si-ФЭУ, подтверждает наши предыдущие результаты экспериментов и моделирований, где матрица Si-ФЭУ оказалась нечувствительной к свету, переизлученному сместителем спектра, если он нанесен перед ФЭУ.

Другим результатом является то, что мы демонстрируем возможность измерения толщины ЭЛ зазора, используя длительность быстрой компоненты, см. рис. 4. Быстрая компонента выделяется из экспериментальной формы S2-сигнала вычитанием медленной и длинной компонент, как показано пунктирной линией на рис. 1. В идеальной ситуации, т.е. в отсутствии диффузии и других искажений быстрой компоненты, ее ширина точно равняется времени дрейфа через ЭЛ зазор, которое определяется полем и толщиной зазора. Из рис. 4 видно, что и в реальной ситуации, даже при простом анализе, время дрейфа очень хорошо описывает длительность быстрой компоненты, и что можно измерить толщину ЭЛ зазора с точностью до 0.2 мм. Отличие полученной толщины зазора от ожидаемой (18 мм), вероятно, связано с ошибкой калибровки уровня жидкости в нашем детекторе и с наличием систематической ошибки измерения времени дрейфа по ширине на полувысоте быстрой компоненты.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы впервые изучили формы S2-сигналов двухфазного детектора в аргоне в широком диапазоне электрических полей. В результате была обнаружена необычная длинная компонента, спадающая по экспоненциальному закону,

постоянная времени которой увеличивается с ростом электрического поля в электролюминесцентном зазоре, от  $\sim 25$  мкс при 4.7 Тд до  $\sim 45$  мкс при 8.5 Тд. Природа этой компоненты на данный момент неясна: проблематично не только объяснить ее длительность, но и необычный рост постоянной времени с возрастанием поля. В любом случае, необходимо дальнейшее, более детальное, изучение форм S2-сигналов.

Вторым важным результатом настоящей работы является то, что мы измерили толщину ЭЛ зазора, используя быструю компоненту S2-сигнала, и показали, что этот метод может достигнуть суб-мм точности. Измерение толщины ЭЛ зазора представляет собой очень важную задачу в двухфазных детекторах, так как на данный момент отсутствуют точные и надежные методы ее измерения, но от нее всецело зависит анализ результатов. Более того, пока это единственный известный способ, с помощью которого можно напрямую измерить прогибание электродов в различных местах ЭЛ зазора, что, по-видимому, наблюдалось в эксперименте DarkSide [2, 7].

Данное исследование было выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 20-12-00008).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Chepel and H. Araujo, J. Instrum. **8**, R04001 (2013).
2. C. Aalseth *et al.* (DarkSide Collab.), Eur. Phys. J. Plus **133**, 131 (2018).
3. E. Aprile *et al.* (XENON Collab.), Phys. Rev. Lett. **121**, 111302 (2018).

4. C. Oliveira, H. Schindler, R. Veenhof, S. Biagi, C. Monteiro, J. dos Santos, A. Ferreira, and J. Veloso, *Phys. Lett. B* **703**, 217 (2011).
5. A. Buzulutskov, *Europhys. Lett.* **117**, 39002 (2017).
6. P. Agnes *et al.* (DarkSide Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **121**, 081307 (2018).
7. P. Agnes *et al.* (DarkSide Collab.), *Nucl. Instrum. Methods A* **904**, 23 (2018).
8. A. Buzulutskov, E. Shemyakina, A. Bondar, A. Dolgov, E. Frolov, V. Nosov, V. Oleynikov, L. Shekhtman, and A. Sokolov, *Astropart. Phys.* **103**, 29 (2018).
9. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, E. Frolov, V. Nosov, V. Oleynikov, E. Shemyakina, and A. Sokolov, *Nucl. Instrum. Methods A* **958**, 162432 (2020).
10. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, V. Nosov, L. Shekhtman, E. Shemyakina, and A. Sokolov, *Nucl. Instrum. Methods A* **845**, 206 (2017).
11. C. E. Aalseth *et al.* (DarkSide Collab.), arXiv: 2004.02024.
12. A. Buzulutskov, *J. Instrum.* **7**, C02025 (2012).
13. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, A. Grebenuk, E. Shemyakina, A. Sokolov, A. Breskin, and D. Thers, *Nucl. Instrum. Methods A* **732**, 213 (2013).
14. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, E. Grishnyaev, V. Nosov, V. Oleynikov, S. Polosatkin, L. Shekhtman, E. Shemyakina, and A. Sokolov, *J. Instrum.* **12**, C05010 (2017).
15. A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov, E. Frolov, V. Nosov, V. Oleynikov, and A. Sokolov, *J. Instrum.* (in press).
16. A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, A. Legkodymov, V. Nosov, V. Oleynikov, V. Porosev, E. Shemyakina, and A. Sokolov, *Instrum. Exp. Tech.* **62**, 746 (2019).

## OBSERVATION OF UNUSUAL LONG COMPONENT IN ELECTROLUMINESCENCE SIGNAL OF TWO-PHASE ARGON DETECTOR

**A. Bondar<sup>1),2)</sup>, E. Borisova<sup>1),2)</sup>, A. Buzulutskov<sup>1),2)</sup>, E. Frolov<sup>1),2)</sup>,  
V. Oleynikov<sup>1),2)</sup>, A. Sokolov<sup>1),2)</sup>**

<sup>1)</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>2)</sup>*Novosibirsk State University, Russia*

Proportional electroluminescence (EL) in noble gases is used in two-phase detectors for dark matter search to record ionization signals in the gas phase induced by particle scattering in the liquid phase (S2 signals). In this work, the EL pulse shapes in a two-phase argon detector have been studied systematically in a wide reduced electric field range, varying from 3 to 9 Td, and at different readout configurations and spectral ranges: using cryogenic PMTs and SiPMs, with and without a wavelength shifter (WLS), in the VUV and visible range. Both fast and slow signal components were observed. In this work we report on observation of unusual long component in S2 signal with time constant of about 40  $\mu$ s. The unusual characteristics of this component are that its time constant increases with the electric field and that its origin can not be explained by any known mechanisms. We also show that the fast component may be used to measure the EL gap thickness with sub-mm resolution. The results obtained can have practical applications in DarkSide dark matter search experiment.