

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФОВЫХ СВОЙСТВ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ GasPixel-ДЕТЕКТОРА ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ ATLAS

*А. С. Болдырев<sup>а,1</sup>, А. С. Романюк<sup>б</sup>, С. Ю. Смирнов<sup>б</sup>, В. О. Тихомиров<sup>в</sup>*

<sup>а</sup> Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ, Москва

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>в</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

Представлены результаты моделирования дрейфовых свойств газовых смесей для детектора GasPixel, предназначенного для получения высокоточной трековой информации при высоких значениях светимости во внутреннем детекторе установки ATLAS на коллайдере супер-LHC.

Results of simulation of gas mixture drift properties for GasPixel detector are presented. The properties of gaseous mixtures for the GasPixel detector have been studied in view of its use in high luminosity tracking applications for the ATLAS Inner Detector in a future super-LHC collider.

PACS: 29.40.Gx; 29.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

GasPixel — газовый пиксельный детектор, в котором считывающий пиксельный сенсор помещен в объем, заполненный рабочим газом. Электрон-ионные пары образуются в рабочем газе вдоль трека заряженной частицы в дрейфовой области над специальной сеткой «Micromegas» [1]. Под действием приложенного электрического поля электроны дрейфуют к сетке и фокусируются в ее отверстиях (рис. 1). К сетке приложено напряжение  $-400$  В по отношению к заземленному пиксельному сенсору, что создает сильное электрическое поле в зазоре  $50$  мкм над сенсором, где происходит размножение электронной лавины. В результате каждый электрон, пролетающий через отверстие сетки, создает лавину, сигнал от которой регистрируется пиксельным сенсором. Определение времени прихода сигнала от лавины позволяет восстановить первоначальное положение электрона над поверхностью сенсора. Таким образом, детектор GasPixel представляет собой времяпроекционную камеру, чувствительную к отдельным электронам. Объединяя данные, полученные по нескольким первичным электронам, можно восстановить в пространстве отрезок трека пролетевшей заряженной частицы. Для технической реализации детектора

---

<sup>1</sup>E-mail: Alexey.Boldyrev@cern.ch

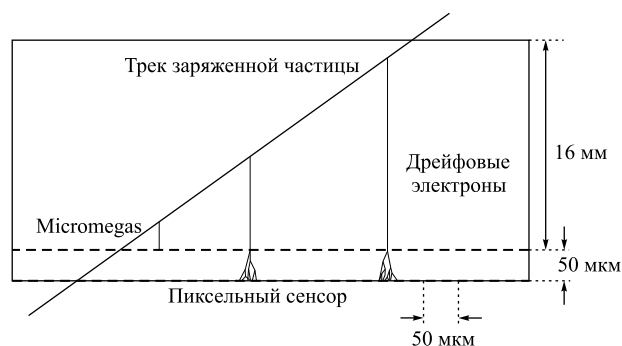


Рис. 1. Схема времяпроекционной камеры детектора GasPixel

GasPixel существенными являются две технологии: создание защитного слоя SiNProt, который предотвращает разрушение пиксельного сенсора при высоковольтных разрядах, и InGrid — фотолитографический процесс нанесения сетки «Micromegas» на сенсор. Снабженный сеткой Micromegas и защитным слоем SiNProt пиксельный сенсор представляет собой активный считывающий анод, заключенный в дрейфовый объем. Время отклика детектора, определяемое свойствами рабочего газа, величиной зазора усиления и величиной приложенного напряжения, обязано соответствовать промежутку между банками пучка супер-LHC (25 нс).

Основными параметрами газовой смеси для предполагаемого варианта геометрии детектора GasPixel являются: скорость дрейфа электронов и ионов в газовой среде дрейфовой камеры, величина диффузии в поперечной вектору электрического поля плоскости, значение угла Лоренца, плотность, стабильность усиления, отсутствие радиационного старения и полимеризации. Поставленной задачей было исследование вышеперечисленных свойств для возможных газовых смесей при различных значениях электрического и магнитного полей и окончательный выбор газовой смеси. Исследование проводилось с помощью компьютерного моделирования свойств газовых смесей, а также с помощью программного обеспечения для моделирования дрейфа электронов и ионов в различных конфигурациях электрического и магнитного полей.

В процессе моделирования было проведено исследование более 50 различных газовых смесей на основе как органических, так и неорганических соединений. Оказалось, что наиболее подходящие для задач трекинга газовые смеси являются преимущественно легковоспламеняющимися и подпадают под ограничения норм безопасности ЦЕРН. В числе иных вариантов могут использоваться смеси на основе Ar или Xe с различной долей добавок CO<sub>2</sub>. Их недостаток — значительно большие значения поперечной диффузии и угла Лоренца, чем у легковоспламеняющихся смесей с органическими добавками. В случае магнитных полей с меньшими, нежели проектная, интенсивностями для задач трекинга удовлетворительными являются смеси Ar/CO<sub>2</sub> и Xe/CO<sub>2</sub>.

## 1. ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для предварительного выбора газа в качестве одной из компонент в различных газовых смесях использовались базы данных сечений электронного рассеяния молекулами данного газа [2, 3].

Для моделирования свойств газовых смесей использовался программный пакет Magboltz 7.1 [4]. Программный пакет Magboltz предназначен для численного решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в газовых смесях под воздействием электрического и магнитного полей.

Для детального моделирования дрейфовых свойств электронов и ионов при различных конфигурациях электрического и магнитного полей во время проекционной камеры применялся программный пакет Garfield 9 [5].

## 2. ВЫБОР ТРЕБУЕМЫХ СВОЙСТВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Задача выбора необходимых свойств газовой смеси тесно связана не только с требуемыми параметрами детектора для проведения физического эксперимента (высокая координатная и угловая точность, работа при высоких нагрузках, реализация триггера внутреннего детектора), но и с параметрами окружающей газовую смесь элементов детектора: стенок дрейфовой камеры, мембраны-катода, чувствительного элемента и подложки. Более того, такая задача связана с общей конфигурацией (геометрией) детектора, расположением радиатора для переходного излучения. Так, для предложенного варианта геометрии детектора важным является обеспечить минимальное значения угла Лоренца для дрейфовых частиц.

Высокие нагрузки налагают требования на скорость дрейфа электронов, что предотвращает также уширение сигнала, снимаемого с чувствительных элементов. Высота дрейфовой камеры в предполагаемом детекторе составляет 4 мм. Минимальное приемлемое значение скорости дрейфа в направлении, параллельном вектору электрического поля, — 4 см/мкс. Желательно, чтобы газовая смесь обеспечивала стабильность скорости дрейфа при различных внешних параметрах, таких как давление и температура.

На размытие сигнального пятна в чувствительных элементах оказывает значительное влияние величина диффузии газовой смеси в плоскости, перпендикулярной вектору электрического поля. Предельное значение для поперечной диффузии для проектных размеров дрейфовой камеры не должно превышать 200 мкм/см. Оказалось, что величина диффузии в газовой смеси зависит также и от величины и направления магнитного поля. Значение диффузии становится минимальным в направлении, перпендикулярном вектору магнитного поля.

Газовая смесь для детектора GasPixel должна обладать усилением 3000–5000 в широком диапазоне значений поля усиления. При этом должна быть обеспечена недостижимость разряда в рабочих значениях электрического поля. Зависимость газового усиления смеси не должна превышать усиление для смеси  $\text{Ar}/\text{CO}_2$ : усиление до  $10^4$  в диапазоне  $70 < E < 80$  кВ/см (см. приложение 2 в [6]). Также желательны максимальное значение коэффициента Таунсенда  $\alpha$  и минимальное значение коэффициента прилипания электронов  $\eta$  [7] для сохранения максимальной информации о ионизации  $dE/dx$  для идентификации частиц.

Необходимо обеспечить высокую ионную мобильность для уменьшения общего времени снятия сигнала.

### 3. ПОИСК КОМПОНЕНТОВ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Первоначально поиск производился среди газов, уже использующихся или использовавшихся в физических экспериментах с дрейфовыми и времяпроекционными камерами. В них применяется следующий принцип регистрации частиц: частица высокой энергии, попадающая в дрейфовый объем, заполненный газовой смесью, выбивает электроны и ионы из атомов газовой смеси, и такие электроны или ионы под действием электрического поля перемещаются к чувствительному элементу.

Чистого однокомпонентного газа, идеального для всех типов дрейфовых камер, не существует. Выбор газовой смеси сильно зависит от множества параметров среды, в которую заключается газ, а также от режима использования детектора на основе сбора дрейфовой информации.

Возможные компоненты можно разделить на следующие группы газов: благородные газы, органические газы,  $\text{CO}_2$ , чистые газы из молекул  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , а также фреоны, азотные соединения и силаны.

**3.1. Благородные газы.** Из группы благородных газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) выбирались газы с большой плотностью для достижения высокой ионизации и обладающие большим сечением упругого взаимодействия в диапазоне энергий 1–100 эВ (см. приложение), а также нерадиоактивные и экономически доступные. Таким свойствам более всего удовлетворяет аргон. Использование He или Ne затруднено вследствие значительного влияния эффекта Пеннинга. Криптон и ксенон в составе смесей позволяют достичь необходимых величин скорости дрейфа (как у аргона), но их высокая стоимость сильно увеличивает общую стоимость установки. Стоит отметить, что при желании сохранить информацию о переходном излучении ксеноновые смеси являются незаменимыми. Использование радона невозможно из-за его радиоактивности, чего не допускают требования безопасности ЦЕРН. Благодаря крайне низкой химической активности благородные газы удобны в использовании как в чистом виде, так и в виде основной части газовой смеси.

**3.2. Органические соединения.** Добавки в виде органических соединений традиционно используются в газовых детекторах элементарных частиц благодаря достижению хороших дрейфовых свойств и наличию значительного фотонного поглощения в таких смесях. Даже незначительные добавки органических компонент сильно меняют кинетические свойства газовой смеси.

Метан широко используется в дрейфовых и времяпроекционных камерах, например, в экспериментах ALPH, STAR, HARP. Наиболее распространена смесь Ar 90 % –  $\text{CH}_4$  10 % (известная как P10). Скорость дрейфа 5 см/мкс в такой смеси достигается уже при напряженности электрического поля 125 В/см. Использование таких малых электрических полей значительно упрощает конструкцию камеры.

Этан и изобутан использовались в многопроволочных камерах благодаря достижению при их применении достаточной скорости дрейфа при значениях электрического поля несколько кВ/см. Наиболее распространенными в таких экспериментах являются смеси Ar 50 % –  $\text{C}_2\text{H}_6$  50 % и Ar 75 % –  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  25 %. Помимо рисков воспламенности этан и изобутан вызывают радиационное старение материалов, используемых в газовой системе, что недопустимо при высокой скорости накопления заряда при рабочих режимах работы ускорителя (несколько Кл/см в год).

Диметиловый эфир ( $C_2H_6O$ , DME) имеет хорошие свойства в качестве гасителя благодаря тому, что обладает минимальным сечением электронного рассеяния уже при энергии электронов 0,9 эВ, что обеспечивает быстрые смеси с малой диффузией и малым значением угла Лоренца, но его использование ограничено вследствие его воспламеняемости.

### **3.3. Иные соединения.**

*3.3.1. Азот и азотные соединения.* Азот  $^{14}N$  может захватить тепловой нейтрон и превратиться в  $^{15}N$ , который может испустить фотон с энергией 10,8 МэВ. Это ведет к нежелательной чувствительности детектора к фоновым тепловым нейтронам. Различные азотные соединения, такие как  $NH_3$ ,  $NO$  и  $N_2O$  являются хорошими гасителями, которые не образуют твердых полимеров, но, как и чистый азот, чувствительны к нейтронам.

*3.3.2. Кислород.* Кислород даже в концентрациях порядка  $10^{-6}$  приводит к прилипанию электронов к молекулам газовой смеси. Явление значительно усиливается в присутствии водяного пара. Прилипание электронов уменьшает как пространственное, так и  $dE/dx$ -разрешение детектора, а также может приводить к газовому разряду.

*3.3.3. Фреоны.* Фреоны являются очень хорошими гасителями в смесях с инертными газами. Такие смеси обеспечивают высокую скорость дрейфа при низких значениях электрического поля. Но использование фреонов сильно ограничено по экологическим соображениям. К тому же  $CF_4$  вступает в реакцию с алюминием в присутствии воды. Еще одной причиной отказа от использования фреонов являются вызываемые ими потери электронов.

*3.3.4. Двуокись углерода.*  $CO_2$  является хорошим гасителем. Но использование чистого  $CO_2$  в качестве газовой смеси в дрейфовом объеме предполагает значительные усиливающие поля  $E$  из-за того, что сечение электронного рассеяния для  $CO_2$  имеет минимум при энергии электрона 1,9 эВ, что превышает аналогичные положения минимумов в сечениях других смесей.

## **4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ Ar, Xe И $CO_2$**

Ниже представлены результаты моделирования для смеси Ar 60 %  $CO_2$  40 % при давлении 1 атм для двух значений магнитного поля (2,0 и 1,4 Тл).

**4.1. Скорость дрейфа.** Для чистых благородных газов и для большинства других чистых газов скорость дрейфа электронов не достигает желаемых 4 см/мкс при напряженности поля  $E < 2,0$  кВ/см. Но при добавлении нескольких процентов  $CO_2$  к аргону скорость дрейфа значительно возрастает, что видно на рис. 2. Причина этого заключается в особенностях сечения электронного рассеяния данных газов. При энергиях электронов до 1 эВ сечение для  $CO_2$  на порядок больше сечений для аргона или ксенона. Сечение  $CO_2$  постепенно уменьшается вплоть до энергии электронов 1,9 эВ, в то время как сечение для аргона проходит так называемый рамзауэровский минимум при 0,23 эВ. Аналогичный минимум для сечения ксенона приходится на 0,65 эВ. Различие в энергии объясняется большей атомной массой Xe, для взаимодействия с атомами которого необходимы электроны с большей кинетической энергией.

При добавлении небольшой доли  $CO_2$  в Ar либо Xe сечение электронного рассеяния существенно возрастает при сдвиге рамзауэровского минимума к большим энергиям.

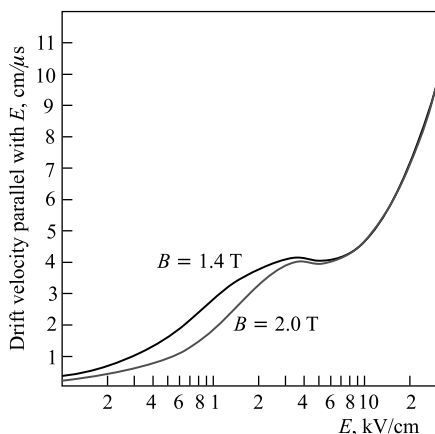


Рис. 2. Скорость дрейфа в газовой смеси Ar 93% – CO<sub>2</sub> 7%

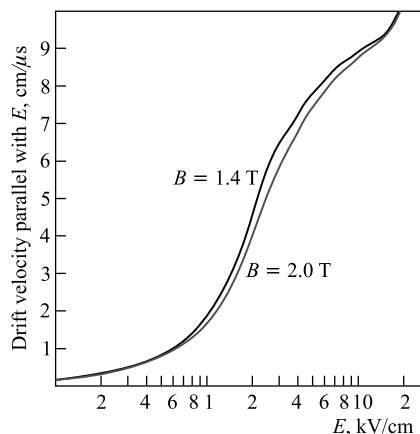


Рис. 3. Скорость дрейфа в газовой смеси Ar 60% – CO<sub>2</sub> 40%

При постоянном электрическом поле энергия электронов уменьшается вместе с увеличением доли CO<sub>2</sub>. Добавление CO<sub>2</sub> ведет ко все меньшему отклонению электронов от их первоначальных траекторий (уменьшению коэффициента диффузии в плоскости, перпендикулярной вектору скорости электронов) и, соответственно, к увеличению их скорости дрейфа.

Величина скорости дрейфа в газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> является неустойчивой в интересующем диапазоне напряженностей электрического поля (0,5–2 кВ/см), как показано на рис. 3.

**4.2. Коэффициент диффузии в направлении, перпендикулярном магнитному полю.**

Для высокоточного трекинга необходимо минимальное значение коэффициента диффузии в газовой смеси. Добавление CO<sub>2</sub> в газ является наиболее эффективным способом уменьшить коэффициенты диффузии в данной смеси. На рис. 4 заметно расщепление коэффициентов диффузии в зависимости от направления магнитного поля: пунктирными линиями показана зависимость коэффициента диффузии вдоль вектора поля E при двух

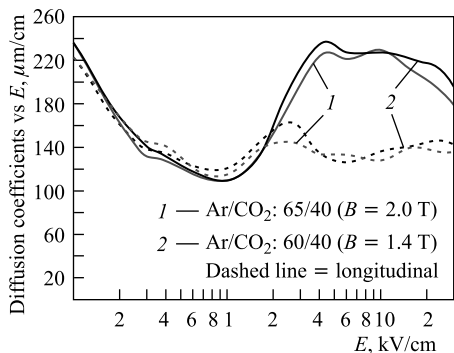


Рис. 4. Коэффициенты диффузии для смеси Ar 60% – CO<sub>2</sub> 40% в присутствии и без магнитного поля

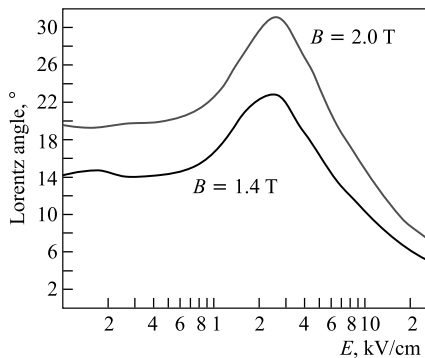


Рис. 5. Величина угла Лоренца для смеси Ar 60% – CO<sub>2</sub> 40% при двух значениях магнитного поля

значениях магнитного поля (1,4 и 2,0 Тл), сплошными — в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля (также при 1,4 и 2,0 Тл).

**4.3. Величина угла Лоренца.** Для постоянного значения магнитного поля максимум угла Лоренца приходится на ту же величину поля  $E$ , что и локальный максимум для скорости дрейфа в той же газовой смеси [8]. Большие значения угла Лоренца означают большее время дрейфа при одинаковой скорости дрейфа. Разумным является смещение в область меньших углов Лоренца вплоть до достижения минимально допустимых значений скорости дрейфа. Рис. 5 показывает, что при меньших значениях магнитного поля становится возможным достигнуть желаемую величину угла Лоренца при неизменном значении электрического поля.

Таблица 1. Смеси на основе Ar

| Газовая смесь (доля компонентов)     |    |    |    | Скорость дрейфа, см/мкс | Коэффициент диффузии в направлении $E \times B$ , мкм/см | Угол Лоренца, ° | Напряженность поля $E$ , кВ/см | Примечание |
|--------------------------------------|----|----|----|-------------------------|--|-----------------|--------------------------------|------------|
| Ar/CF <sub>4</sub> /изобутан         | 95 | 3  | 2  | 5,5                     | 65   | 44              | 0,3                            | а          |
| Ar/CF <sub>4</sub> /силан            | 95 | 2  | 3  | 6,2                     | 75   | 44              | 0,4                            | а          |
| Ar/DME/CO <sub>2</sub>               | 40 | 30 | 30 | 2,2                     | 75   | 9               | 2,0                            | п          |
| Ar/silane/изобутан                   | 95 | 3  | 2  | 4,6                     | 80   | 44              | 0,3                            | п          |
| Ar/DME/CO <sub>2</sub>               | 50 | 25 | 25 | 2,5                     | 90   | 15              | 2,0                            | п          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /н-пентан         | 30 | 40 | 30 | 2,7                     | 96   | 16              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /н-пентан         | 30 | 30 | 40 | 2,7                     | 105  | 17              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /н-пентан         | 50 | 30 | 20 | 3,4                     | 115  | 21              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /н-пентан         | 50 | 20 | 30 | 3,3                     | 122  | 22              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /изобутан         | 95 | 2  | 3  | 4,5                     | 130  | 42              | 0,5                            | п          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 65 | 25 | 10 | 5,0                     | 140  | 25              | 1,8                            | э          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 16 | 4  | 4,0                     | 150  | 26              | 1,5                            | а          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 80 | 10 | 10 | 4,4                     | 150  | 34              | 1,0                            | э          |
| Ar/CO <sub>2</sub>                   | 60 | 40 | —  | 4,0                     | 155  | 29              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 70 | 25 | 5  | 5,0                     | 160  | 25              | 2,0                            | э          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /изобутан         | 95 | 3  | 2  | 3,1                     | 170  | 41              | 0,4                            | п          |
| Ar/CO <sub>2</sub>                   | 65 | 35 | —  | 4,2                     | 175  | 33              | 2,0                            |            |
| Ar/н-пентан                          | 70 | 30 | —  | 3,3                     | 177  | 32              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub>                   | 70 | 30 | —  | 4,4                     | 185  | 37              | 2,0                            |            |
| Ar/CO <sub>2</sub> /DME              | 90 | 3  | 7  | 3,5                     | 200  | 32              | 0,9                            | п          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 90 | 6  | 4  | 4,4                     | 200  | 36              | 0,9                            | э          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 94 | 3  | 3  | 3,2                     | 210  | 35              | 0,7                            | а          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 10 | 10 | 5,0                     | 220  | 22              | 2,0                            | а          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 90 | 5  | 5  | 4,0                     | 225  | 30              | 1,0                            | а          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /DME              | 90 | 7  | 3  | 4,0                     | 235  | 32              | 1,0                            | п          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 93 | 4  | 3  | 4,0                     | 250  | 34              | 0,9                            | э          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 95 | 2  | 3  | 3,2                     | 250  | 35              | 0,7                            | а          |
| Ar/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 95 | 3  | 2  | 3,4                     | 310  | 32              | 0,9                            | э          |

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приложении настоящей статьи приведены сводные данные по моделированию газовой смеси, пригодной для использования в качестве рабочего газа в детекторе GasPixel. С позиций отсутствия полимеризации, невоспламеняемости, нетоксичности, неагрессивности для использования в детекторе GasPixel удовлетворяют газовые смеси на основе Ar и н-пентана с различной концентрацией добавок CO<sub>2</sub>, зависящей от окончательного выбора параметров системы трекинга. Для возможности регистрации переходного излучения оптимальным решением является использование смесей Xe–CO<sub>2</sub>.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

В табл. 1–4 приведены некоторые характеристики отобранных смесей. Отбирались смеси, для которых значение скорости дрейфа является максимальным при величине поля усиления не более 2 кВ/см (за исключением смесей CO<sub>2</sub>/DME). Максимум ско-

Таблица 2. Смесей на основе Хе

| Газовая смесь (доля компонентов)     |    |    |    | Скорость дрейфа, см/мкс | Коэффициент диффузии в направлении $E \times B$ , мкм/см | Угол Лоренца, ° | Напряженность поля $E$ , кВ/см | Примечание |
|--------------------------------------|----|----|----|-------------------------|--|-----------------|--------------------------------|------------|
|                                      |    |    |    |                         |  |                 |                                |            |
| Хе/CF <sub>4</sub> /силан            | 80 | 16 | 4  | 5,0                     | 120  | 25              | 2,0                            | а, п       |
| Хе/CF <sub>4</sub> /изобутан         | 80 | 16 | 4  | 5,0                     | 130  | 26              | 1,8                            | а, п       |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 16 | 4  | 4,8                     | 135  | 24              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 65 | 30 | 5  | 4,0                     | 150  | 20              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 80 | 16 | 4  | 6,0                     | 150  | 28              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /CF <sub>4</sub>  | 70 | 27 | 3  | 4,5                     | 155  | 21              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 70 | 27 | 3  | 3,8                     | 160  | 20              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /силан            | 70 | 27 | 3  | 4,5                     | 165  | 22              | 2,0                            | п          |
| Хе/CO <sub>2</sub>                   | 70 | 30 | —  | 4,3                     | 170  | 22              | 1,9                            |            |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 70 | 25 | 5  | 4,7                     | 170  | 23              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /силан            | 80 | 16 | 4  | 4,0                     | 170  | 21              | 1,0                            | п          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /изобутан         | 70 | 27 | 3  | 4,5                     | 175  | 21              | 1,9                            | п          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 70 | 27 | 3  | 4,4                     | 185  | 25              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub>                   | 75 | 25 | —  | 4,5                     | 190  | 31              | 2,0                            |            |
| Хе/CO <sub>2</sub>                   | 65 | 35 | —  | 4,3                     | 196  | 28              | 2,0                            |            |
| Хе/CO <sub>2</sub>                   | 80 | 20 | —  | 3,8                     | 220  | 38              | 1,8                            |            |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 80 | 17 | 3  | 4,5                     | 220  | 24              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 80 | 10 | 10 | 4,8                     | 220  | 25              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 14 | 6  | 4,0                     | 220  | 21              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 10 | 10 | 4,9                     | 225  | 22              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /силан            | 93 | 4  | 3  | 3,8                     | 230  | 30              | 1,5                            | п          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 16 | 4  | 5,3                     | 245  | 24              | 2,0                            | а          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> O | 80 | 15 | 5  | 4,7                     | 250  | 25              | 2,0                            | э          |
| Хе/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub>  | 80 | 4  | 16 | 2,7                     | 205  | 16              | 2,0                            | а          |



рости дрейфа в смесях всегда соответствует максимуму угла Лоренца. Для уменьшения последнего в случае быстрых смесей все значения брались при величинах поля усиления  $< 2$  кВ/см. Смеси сортированы в порядке увеличения коэффициента диффузии в направлении  $E \times B$ . В колонке «Примечание» указаны следующие свойства компонентов газовой смеси: а — агрессивный, химически активный газ; п — полимеризующийся и способный вызывать радиационное старение материалов газ; э — электроотрицательный газ.

На рис. 6 показано измеренное значение газового усиления для ряда смесей на основе аргона.

На рис. 7 приведены данные [2] по сечениям электронного рассеяния основными компонентами газовых смесей, использовавшиеся в моделировании.

Таблица 3. Смесн на основе Хе/Аг

| Газовая смесь<br>(доля компонентов)    |    |    |    | Скорость<br>дрейфа,<br>см/мкс | Коэффициент<br>диффузии<br>в направлении<br>$E \times B$ , мкм/см | Угол<br>Лорен-<br>ца,<br>° | Напряжен-<br>ность<br>поля $E$ ,<br>кВ/см | Приме-<br>чание |   |
|--|----|----|----|-------------------------------|---|----------------------------|---|-----------------|---|
|  |    |    |    |                               |   |                            |   |                 |   |
| Аг/DME/CO <sub>2</sub> /Хе             | 20 | 35 | 40 | 5                             | 1,5   | 75                         | 7   | 2,0             | п |
| Аг/DME/CO <sub>2</sub> /Хе             | 30 | 35 | 30 | 5                             | 1,7   | 77                         | 8   | 2,0             | п |
| Аг/DME/CO <sub>2</sub> /Хе             | 25 | 35 | 35 | 5                             | 1,5   | 79                         | 7   | 2,0             | п |
| Аг/DME/CO <sub>2</sub> /Хе             | 30 | 30 | 35 | 5                             | 1,8   | 80                         | 8   | 2,0             | п |
| Аг/DME/CO <sub>2</sub> /Хе             | 20 | 40 | 35 | 5                             | 1,4   | 87                         | 6   | 2,0             | п |
| Аг/DME/Хе                              | 55 | 40 | 5  | —                             | 4,6   | 145                        | 20  | 2,0             | п |
| Хе/Аг/силан                            | 45 | 45 | 10 | —                             | 5,0   | 155                        | 35  | 1,2             | п |
| Аг/DME/Хе                              | 60 | 35 | 5  | —                             | 5,0   | 155                        | 22  | 2,0             | п |
| Аг/DME/Хе                              | 65 | 30 | 5  | —                             | 5,4   | 165                        | 24  | 2,0             | п |
| Хе/Аг/силан/изобутан                   | 45 | 45 | 8  | 2                             | 5,0   | 180                        | 34  | 1,3             | п |
| Хе/Аг/CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub> | 40 | 40 | 14 | 6                             | 4,0   | 190                        | 22  | 1,8             | а |
| Аг/DME/Хе                              | 70 | 25 | 5  | —                             | 5,5   | 200                        | 25  | 1,9             | п |
| Хе/Аг/CO <sub>2</sub> /DME             | 40 | 50 | 5  | 5                             | 3,2   | 210                        | 29  | 1,0             | п |
| Хе/Аг/силан/изобутан                   | 45 | 50 | 3  | 2                             | 3,5   | 210                        | 35  | 0,8             | п |
| Хе/Аг/CO <sub>2</sub> /DME             | 35 | 50 | 10 | 5                             | 4,0   | 220                        | 27  | 1,5             | п |
| Хе/Аг/DME                              | 45 | 45 | 10 | —                             | 3,0   | 250                        | 25  | 1,2             | п |
| Хе/Аг/DME/H <sub>2</sub>               | 40 | 50 | 7  | 3                             | 2,8   | 250                        | 27  | 0,9             | п |
| Хе/Аг/CO <sub>2</sub> /изобутан        | 45 | 50 | 3  | 2                             | 2,5   | 250                        | 34  | 0,6             | п |
| Хе/Аг/DME                              | 50 | 45 | 5  | —                             | 2,3   | 255                        | 31  | 0,7             | п |

Таблица 4. Прочие смеси

| Газовая смесь (доля<br>компонентов) |     |    |    | Скорость<br>дрейфа,<br>см/мкс | Коэффициент<br>диффузии в направлении<br>$E \times B$ , мкм/см | Угол<br>Лоренца,<br>° | Напряженность<br>поля $E$ ,<br>кВ/см | Примечание |
|-------------------------------------|-----|----|----|-------------------------------|--|-----------------------|--------------------------------------|------------|
|                                     |     |    |    |                               |  |                       |                                      |            |
| CO <sub>2</sub> /н-пентал           | 40  | 60 | —  | 2,0                           | 80   | 12                    | 2,0                                  |            |
| CO <sub>2</sub> /н-пентал           | 50  | 50 | —  | 2,1                           | 82   | 13                    | 2,0                                  |            |
| CO <sub>2</sub> /н-пентал           | 60  | 40 | —  | 2,3                           | 90   | 14                    | 2,0                                  |            |
| CO <sub>2</sub> /DME                | 60  | 40 | —  | 5,0                           | 110  | 8,0                   | 5,9                                  | п          |
| CO <sub>2</sub> /DME/Аг             | 35  | 35 | 30 | 4,2                           | 115  | 9,6                   | 4,0                                  | п          |
| CO <sub>2</sub> /DME                | 80  | 20 | —  | 6,0                           | 120  | 9,1                   | 5,9                                  | п          |
| CO <sub>2</sub> /DME/Аг             | 40  | 40 | 20 | 5,0                           | 120  | 8,2                   | 5,0                                  | п          |
| CO <sub>2</sub> /DME                | 70  | 30 | —  | 5,8                           | 125  | 8,0                   | 5,9                                  | п          |
| CO <sub>2</sub> /DME                | 90  | 10 | —  | 6,6                           | 135  | 10,1                  | 5,9                                  | п          |
| CO <sub>2</sub>                     | 100 | —  | —  | 7,0                           | 140  | 16,8                  | 5,8                                  |            |

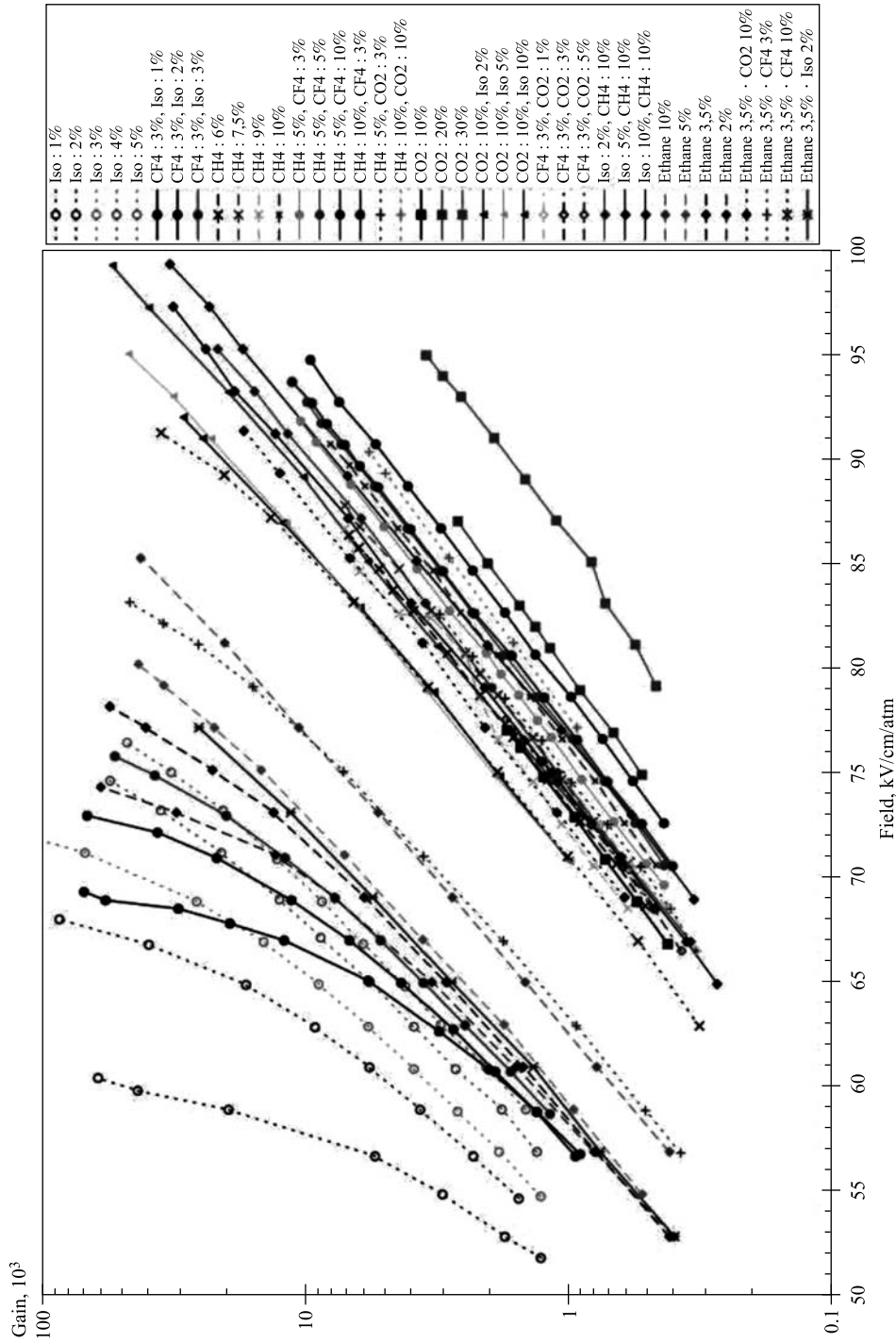


Рис. 6. Измеренные значения газового усиления как функции усиливающего поля для 50-мкм шели Мегатонга-детектора при использовании смесей на основе Ar с малыми добавками других компонентов [6]

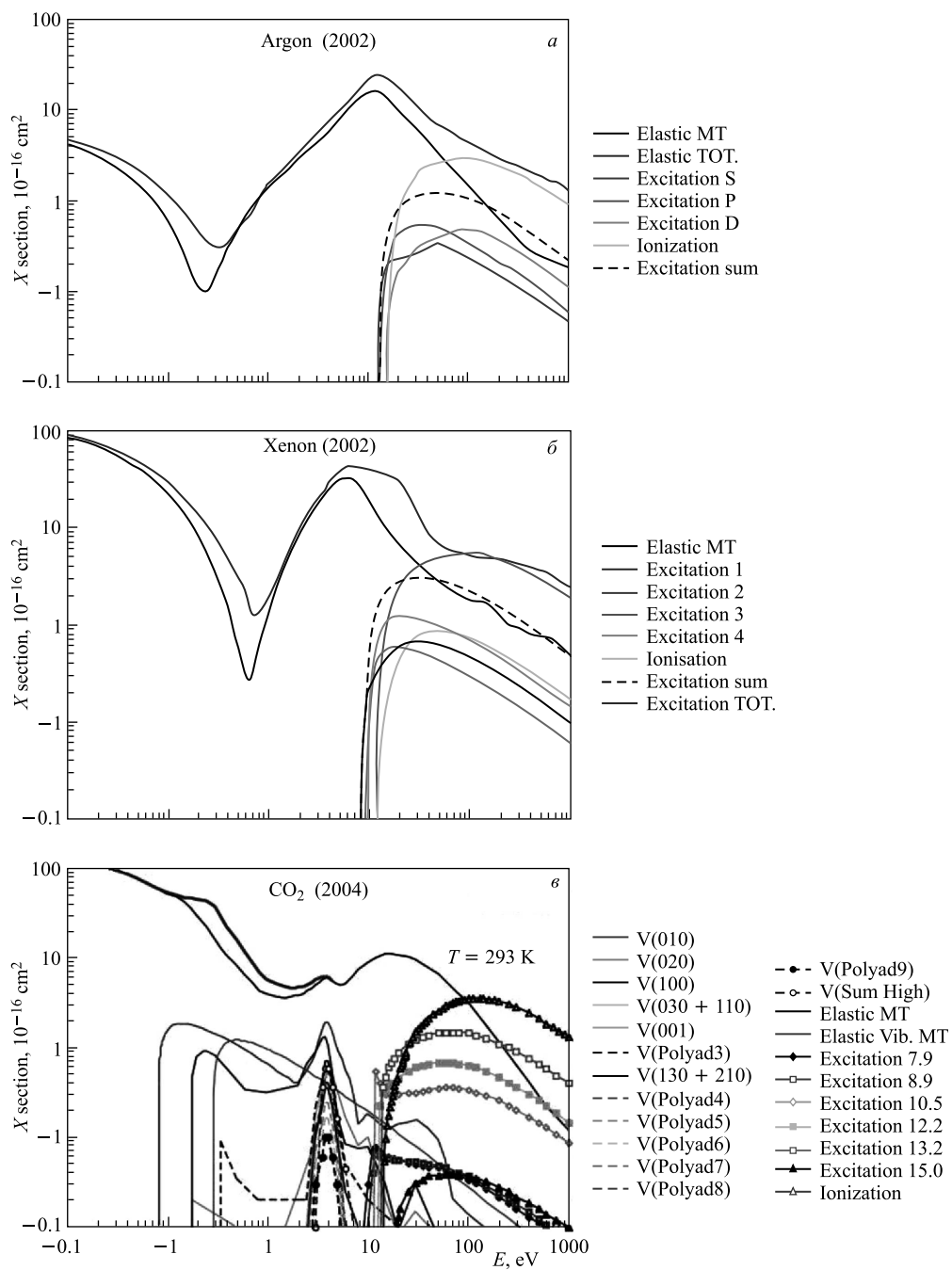


Рис. 7. Сечения электронного рассеяния из [2], использовавшиеся в моделировании

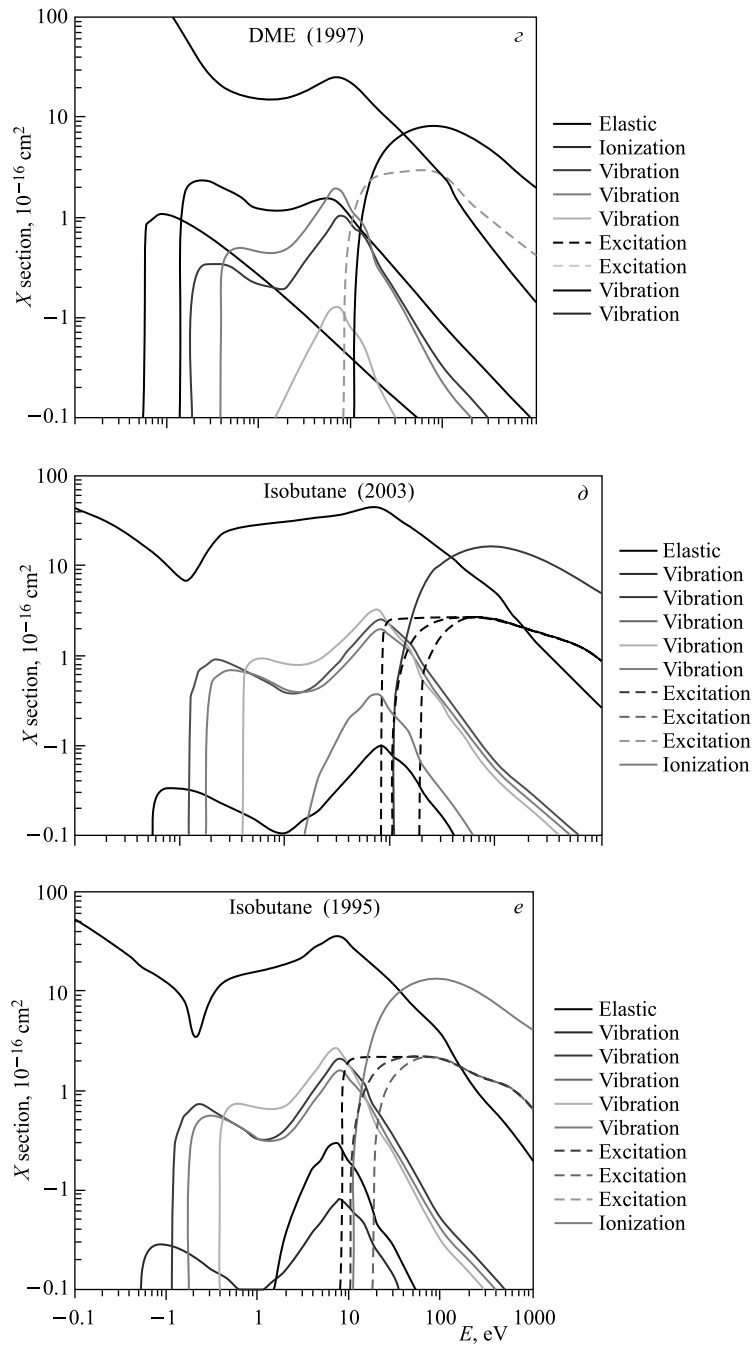


Рис. 7. Продолжение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giomataris Y. et al.* MICROMEGAS: A High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 376. P. 29–35.
2. PHELPS Database. <http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr> (база данных сечений электронного рассеяния на молекулах газов).
3. Magboltz cross section Database. <http://rjd.web.cern.ch/rjd/cgi-bin/cross> (база данных сечений электронного рассеяния на молекулах газов, используемых в программе Magboltz).
4. Magboltz code. <http://consult.cern.ch/writeup/magboltz> (программа для численного решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в газовых смесях).
5. Garfield code. <http://garfield.web.cern.ch/garfield> (программный пакет для детального моделирования двумерных и трехмерных дрейфовых камер).
6. *Attie D.* TPC Review // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 89–93.
7. *Хранак А. Г., Якубов И. Т.* Электроны и позитроны в плотных газах // УФН. 1979. Т. 129, вып. 1. С. 45–86.
8. *Kunst T., Götz B., Schmidt B.* Precision Measurements of Magnetic Deflection Angles and Drift Velocities in Crossed Electric and Magnetic Fields // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 324. P. 127–140.