

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Обершт София Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение характеристик полупроводникового детектора на основе  
арсенида галлия**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

**Научный руководитель:**

д. ф.-м. н. Л. И. Шехтман

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Преподаватель практикума**

С. В. Туманов

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью данной работы является изучение характеристик полупроводникового детектора на основе арсенида галлия. Принцип действия детектора подобен ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит в кристалле, а не в газе. Образовавшиеся при синхротронном излучении электронно-дырочные пары дрейфуют к электродам под действием внешнего электрического поля и создают во внешней цепи ток. Были рассчитаны формы токовых сигналов для электронов и дырок при облучении со стороны положительного и отрицательного электродов. Теоретические результаты согласуются с данными, полученными на накопителе ВЭПП-3 .

Ключевые слова: полупроводниковый детектор, синхротронное излучение

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Устройство прототипа детектора на основе арсенида галлия .....	5
3. Расчет формы токового сигнала с GaAs детектора .....	6
4. Измерения .....	9
5. Заключение .....	11
6. Список литературы .....	12

## 1. Введение

Синхротронное излучение (СИ) позволяет изучать структуру вещества во время быстропротекающего процесса. Поскольку СИ представляет собой излучение сгустков электронов, длительность вспышек может быть очень короткой. Детектор, способный регистрировать сигнал от одной вспышки СИ, не смешивая его с сигналами от других сгустков, дает возможность получать информацию о состоянии вещества изучаемого объекта с очень высоким временным разрешением. В настоящее время на накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4М работают детекторы DIMEX-G, основанные на газовой технологии. Эти детекторы имеют существенные ограничения по максимальному регистрируемому потоку излучения, а также по пространственному и временному разрешению. В настоящее время разрабатывается новый детектор DIMEX-Si, в котором излучение будет регистрироваться с помощью кремниевого микрополоскового сенсора. Однако кремний обладает низким сечением взаимодействия с фотонами высоких энергий (выше 30 кэВ) и, поэтому эффективность этого детектора на энергиях выше 30 кэВ будет низкой. Хорошей альтернативой кремнию может быть арсенид галлия, - это более тяжелый материал с более высоким  $Z$ , обладающий более высоким сечением взаимодействия с рентгеновским излучением, чем кремний. Арсенид галлия - это химическое соединение мышьяка и галлия. По сравнению с другими полупроводниками, такими как кремний и германий, он превосходит их по следующим свойствам: подвижность электронов ( $8500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при 300К), напряженность электрического поля. Это позволяет детектору на основе арсенида галлия получать более высокий сигнал. Целью данной работы было изучение характеристик прибора. Для этого произведены расчеты формы токовых сигналов от вспышки СИ и сравнение их с данными, полученными на накопителе ВЭПП-3.

## 2. Устройство прототипа детектора на основе арсенида галлия

Детектор на основе арсенида галлия (GaAs) - ионизационная камера с двумя параллельными электродами, один из которых представляет собой полосковую считывающую систему. Пучок СИ попадает в чувствительный объем между электродами и создает в кристалле арсенида галлия электронно-дырочные пары. Электрическое поле, приложенное к кристаллу, притягивает электроны и дырки к электродам.

Принцип работы детектора можно понять из зонной теории твердого тела. В соответствии с квантовой теорией энергии электронов в атоме могут принимать лишь некоторые дискретные значения. В твердом теле из-за малого расстояния между атомами внешние электронные оболочки соседних атомов соприкасаются и перекрываются. В результате этого электроны одного уровня атома могут переходить на соответствующий уровень соседнего атома без затраты энергии. Дискретные уровни энергии электронов образуют так называемые энергетические зоны. Каждая зона может содержать конечное число электронов. Самая заполненная называется зоной валентности, а частично заполненная или пустая – зоной проводимости. Промежуточные значения энергии между двумя этими зонами не соответствуют ни одному состоянию электрона и составляют запрещенную зону. В полупроводниках зона проводимости остается пустой при низких температурах. При повышении температуры часть электронов получает энергию, достаточную для перехода в нее. На месте электронов образуются дырки, которые также могут дрейфовать в электрическом поле.

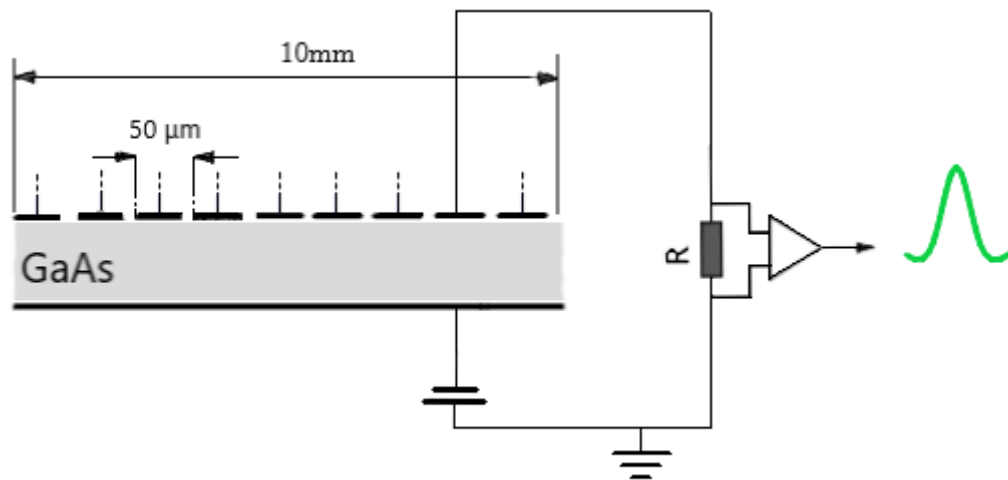


Рис.1. Устройство прототипа детектора на основе GaAs

### 3. Расчет формы токового сигнала с GaAs детектора

Синхротронное излучение (СИ) представляет собой сгустки фотонов, которые в чувствительном объеме детектора частично рассеиваются на большие углы (эффект Комптона) или поглощаются веществом (фотоэффект), вызывая в нем ионизацию. Электроны и дырки в результате начинают дрейфовать в противоположные стороны к электродам. Согласно теореме Рамо-Шокли, заряд  $Q$ , движущийся в конденсаторе со скоростью  $v$ , создает во внешней цепи ток равный

$$I = Q \frac{v}{L}, \quad (1)$$

где  $L$  - расстояние между пластинами.

Пучок фотонов в веществе затухает экспоненциально

$$\rho = \rho_0 e^{-\mu y}, \quad (2)$$

где  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения, связанный с процессами взаимодействия фотонов с веществом.

Зная распределение плотности фотонного пучка в веществе и считая, что фотоны полностью поглощаются веществом, можно поставить задачу о расчете формы сигнала с детектора при однократной вспышке СИ, которая соответствует одному сгустку излучения.

В произвольный момент времени  $t$  ток  $I$  равен сумме элементарных токов, создаваемых зарядами тонкого слоя вещества  $I(t) = \int_0^{\mu_i Et} dI(y)$ , где  $v = \mu_i E$  - скорость заряда,  $\mu_i$  - его подвижность. Учитывая соотношения (1), (2) элементарный ток для одного слоя  $dy$  равен

$$dI(y) = \frac{\rho(y)(L-y)dy}{tL} = \frac{\rho(y)(L-y)dy}{\frac{L-y}{\mu_i E} L} = \frac{\rho(y)\mu_i E dy}{L}$$

При облучении со стороны положительного электрода в момент времени  $t$  сила тока от электронов и дырок соответственно равны.

$$I_e = \frac{\rho_0 \mu_e E}{L\mu} \int_{\mu_e Et}^L e^{-\mu y} dy = \frac{\rho_0 \mu_e E}{L\mu} (e^{-\mu \mu_e Et} - e^{-\mu L})$$

и

$$I_h = \frac{\rho_0 \mu_h E}{L\mu} \int_0^{L-\mu_h Et} e^{-\mu y} dy = \frac{\rho_0 \mu_h E}{L\mu} (1 - e^{-(\mu_h Et - L)\mu}) = \frac{\rho_0 \mu_h E}{L\mu} (1 - \frac{e^{-\mu L}}{e^{-\mu \mu_h Et}})$$

При облучении со стороны отрицательного электрода должен наблюдаться противоположный результат:

$$I_e = \frac{\rho_0 \mu_e E}{L\mu} \int_0^{L-\mu_e Et} e^{-\mu y} dy = \frac{\rho_0 \mu_e E}{L\mu} (1 - e^{-(\mu_e Et - L)\mu}) = \frac{\rho_0 \mu_e E}{L\mu} (1 - \frac{e^{-\mu L}}{e^{-\mu \mu_e Et}})$$

и

$$I_h = \frac{\rho_0 \mu_h E}{L \mu} \int_{\mu_h E t}^L e^{-\mu y} dy = \frac{\rho_0 \mu_h E}{L \mu} (e^{-\mu \mu_h E t} - e^{-\mu L})$$

Формы сигналов для электронов и дырок при облучении со стороны положительного и отрицательного электродов приведены на Рис.1 и Рис.2 соответственно. Расчеты производились для пучка фотонов с энергией 20кэВ и единичной плотностью, линейный коэффициент поглощения для данной энергии  $\mu=225,67\text{см}^{-1}$ . Подвижность электронов и дырок в GaAs соответственно равна  $\mu_e=8500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_h=400\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Поле, подаваемое на сенсор толщиной 0,5 мм  $E=6000\text{В}/\text{см}$ .

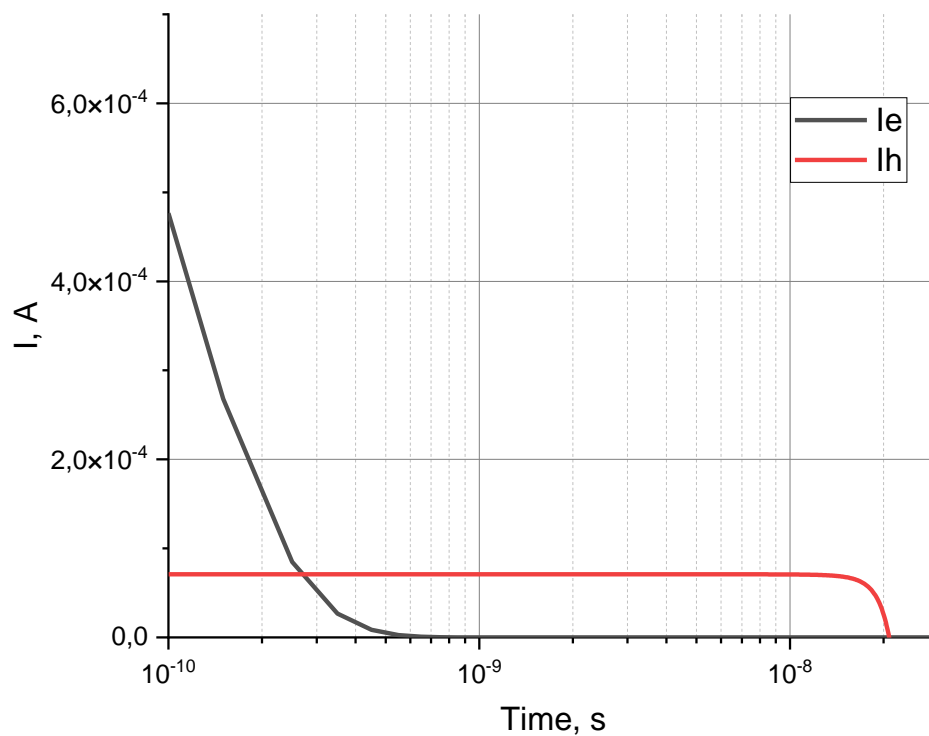


Рис.2. Формы токовых сигналов с GaAs детектора при облучении со стороны положительного электрода



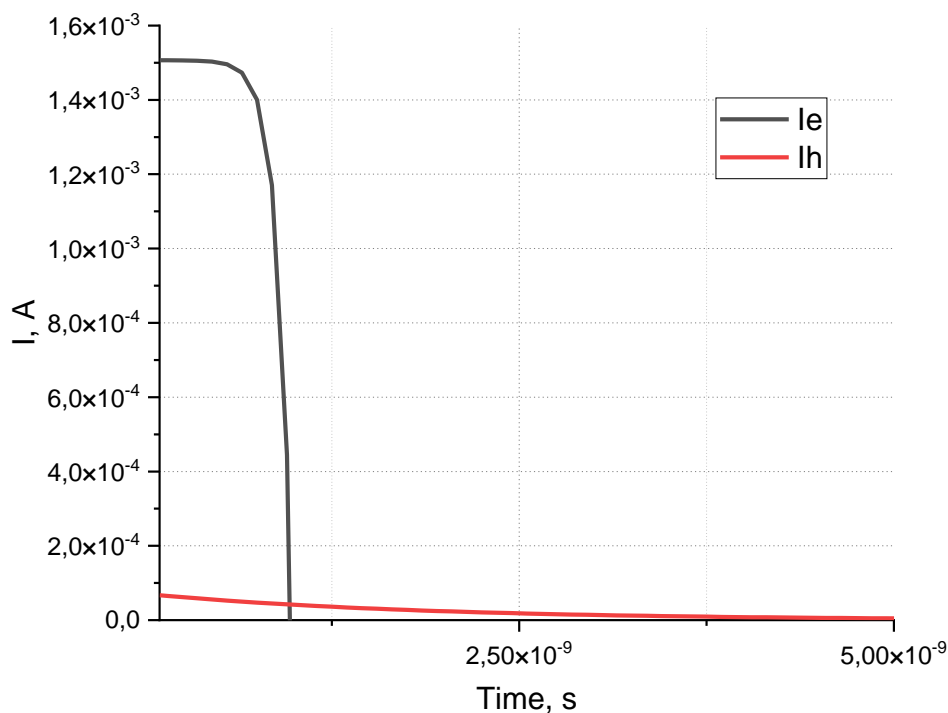


Рис.3. Формы токовых сигналов с GaAs детектора при облучении со стороны отрицательного электрода

#### 4. Измерения

Важной характеристикой детектора является зависимость тока от напряжения, вольт-амперная характеристика. Для работы в качестве детектора рентгеновского излучения важно, чтобы ток в отсутствие облучения был существенно меньше, чем ток при облучении пучком СИ. Результат измерения вольт-амперной характеристики первого сенсора GaAs показан на рис. 4. Видно, что при максимальном напряжении на сенсоре 300 В ток не превышает величину 1.5 мкА. Сенсор имеет 200 полосок. Таким образом, ток через одну полоску не превышает 7.5 нА. При времени экспозиции 1 мкс заряд, накопленный во входном интеграторе канала регистрации, составит  $7.5 \times 10^{-15}$  Кл или ~50000 электронов, что эквивалентно сигналу от всего ~2.5 фотонов с

энергией 70 кэВ. Таким образом, такой ток позволит создать детектор, работающий в интегрирующем режиме.

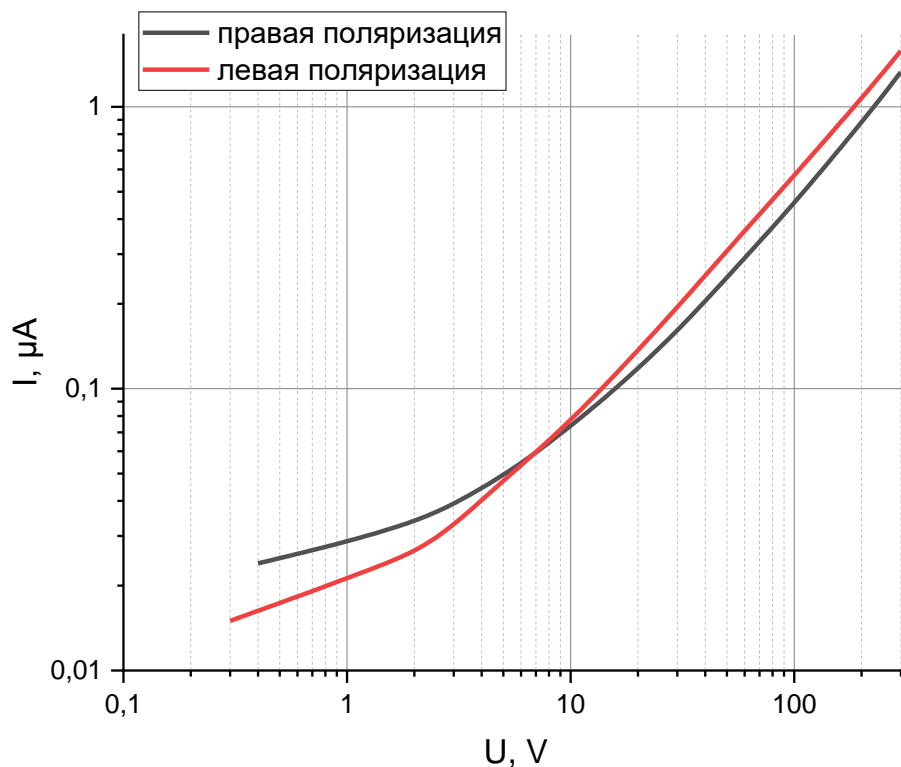


Рис.4. Вольт-амперная характеристика детектора на основе GaAs при положительной и отрицательной поляризации

Результат измерения сигнала от одной вспышки СИ с одной полоски детектора показан на Рис.5. Видно, что сигнал имеет быструю компоненту с характерным временем (ширина на половине высоты) около 3 нс и медленную компоненту с характерным временем порядка 10 нс. Поскольку облучение в данном измерении велось со стороны отрицательного электрода, этот результат следует сравнивать с расчетными формами сигналов, представленными на Рис.3. Видно, что характерные времена в измерении несколько больше, чем в результате расчетов. Здесь следует учесть, что осциллограф имеет полосу пропускания, ограниченную величиной 500 МГц (2 нс), что объясняет величину быстрой компоненты сигнала. Тот факт, что ток дырок затухает медленнее, чем

расчетный, может объясняться наличием жесткой компоненты в спектре СИ (в расчете энергия излучения равнялась 20 кэВ). Кроме того, возможно наличие более медленных дырок в материале детектора. Однако полное время затухания сигнала не превышает 20 нс, что вполне достаточно для создания детектора для регистрации быстропротекающих процессов DIMEX-GaAs.

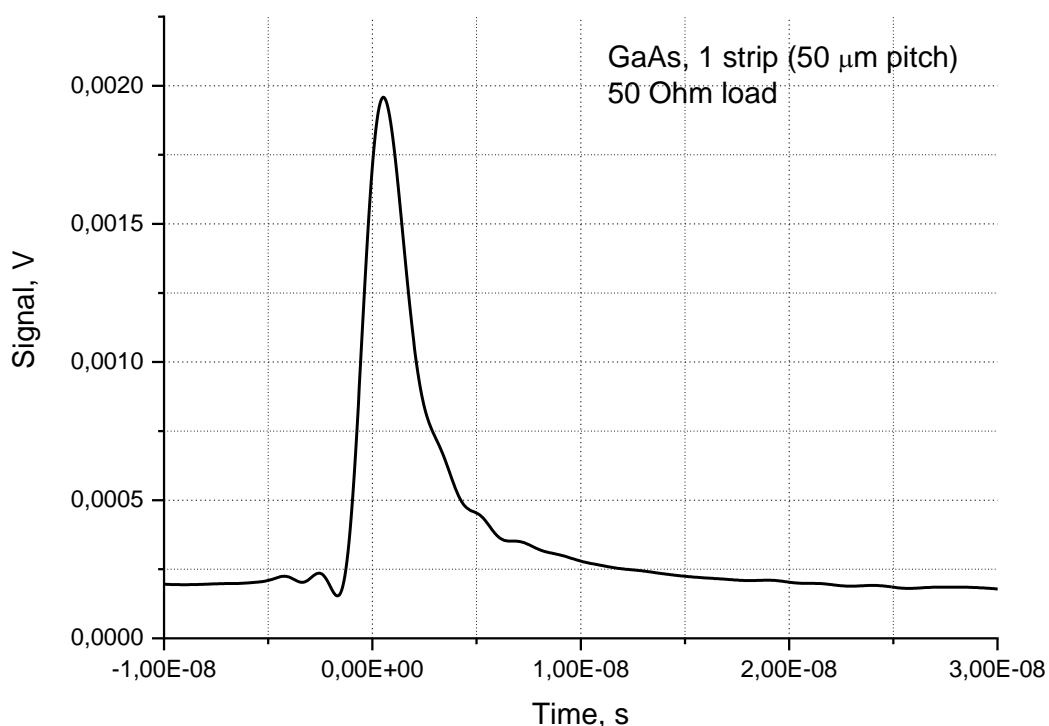


Рис.5. Сигнал вспышки СИ с одной полоски детектора

## 5. Заключение

В ходе данной работы были изучены характеристики детектора на основе арсенида галлия. При напряжении на сенсоре 300 В ток через одну полоску электрода не превышает 7.5 нА. Для времени экспозиции 1 мкс это значит, что заряд, накопленный во входном интеграторе канала регистрации, составит  $7.5 \times 10^{-15}$  Кл. Полное время затухания сигнала не превышает 20 нс. Оценка

результатов расчета и сравнение их с измерениями на накопителе показали, что детектор может работать в интегрирующем режиме для регистрации быстропротекающих процессов. Электронные свойства арсенида галлия позволяют разработать детектор с более высокой квантовой эффективностью, чем у кремния.

## **6.Список литературы**

1. Клаус Группен. Детекторы элементарных частиц : справочное пособие под редакцией Л. М. Курдадзе, С. И. Эйдельмана, 1999. - 26 с.
2. А. Н. Иновенков, О.В. Константинов, В.И. Пирогов. Обобщение теоремы Рамо-Шокли на случай высокоимпедансного внешнего включения : ЖТФ, 1993. Т. 63. № 9. 1–5 с.