

*Лычковский Д.П.,*

*студент магистратуры*

*2 курс, направление «Микропроцессорные системы»*

*Институт информатики и вычислительной техники*

*Россия, г. Красноярск*

*Бочаров А.Н.,*

*доцент кафедры «Информационно-управляющих систем»*

*Сибирский государственный университет науки и технологий*

*имени академика М.Ф. Решетнева*

*Россия, г. Красноярск*

## **ДЕТЕКТОРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛС**

***Аннотация:** Детекторы рентгеновского излучения играют важную роль в процессе сваривания деталей электронно-лучевой сваркой. В данной статье рассмотрено несколько видов детекторов рентгеновского излучения и их принцип работы. Рассмотрены недостатки и основные преимущества детекторов каждого типа.*

***Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, рентгеновский датчик, контроль стыка, сварной шов, магнитные поля.*

***Annotation:** X-ray detectors play an important role in the process of welding parts by electron beam welding. This article shows several types of X-ray detectors and their principle of operation. The disadvantages and main advantages of each type of detector are considered.*

***Keywords:** electron beam welding, X-ray sensor, junction control, weld, magnetic fields.*

## **Введение**

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины к ширине шва требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью свариваемого стыка. Точность позиционирования зависит от ширины зазора, толщины деталей, ширины шва и обычно не превышает 0,1 мм. При сварке мелких деталей с узкими швами предпочтительнее вести сварку с автоматическим позиционированием по стыку. Это особенно актуально при сварке дорогостоящих изделий, где брак недопустим.

Автоматическое слежение за стыком непосредственно в процессе ЭЛС было внедрено в промышленную эксплуатацию после почти двадцатилетних исследований, что объясняется трудностью аппаратурной реализации этого способа.

При взаимодействии электронного пучка с материалом свариваемого изделия электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс сопровождается возникновением рентгеновского излучения на поверхности свариваемого изделия. Рентгеновские лучи распространяются точно по прямым линиям, их нельзя отклонить с помощью электромагнитных полей, ни преломлять с помощью паров. Они проходят сквозь пары металла с небольшим ослаблением. Испытания рентгеновских датчиков различного типа показали, что у них более высокая помехозащищенность по сравнению с вторично-эмиссионными, что свидетельствует о перспективности их применения.

При отсутствии плавления возможность использования тормозного рентгеновского излучения для контроля положения стыка заключается в том, что при попадании пучка в стык, часть электронов проникает в зазор между деталями и тормозится в глубине свариваемого материала. Возникающее при этом рентгеновское излучение распространяется в пространстве неравномерно.

В направлении, параллельном стыку деталей, рентгеновское излучение распространяется без ослабления. Во все других направлениях рентгеновское излучение выходит на поверхность свариваемого изделия ослабленным на величину, пропорциональную глубине зазора. Рентгеновский

датчик стыка будет фиксировать максимум излучения, если пучок находится на поверхности детали, и минимум излучения, если ось пучка находится точно на стыке.

### **Ионизационная камера**

Действие ионизационной камеры основано на сборе (в форме электрического тока) ионов, образующихся при прохождении через камеру заряженных частиц. Электрический ток, возникающий в результате ионизации, дается выражением:

$$i = nqvt,$$

где  $n$  - число образовавшихся ионов,  $q$  - электрический заряд каждого иона, а  $t$  - время, необходимое для того, чтобы собрать ионы. Ток можно преобразовать в падение напряжения, разряжая заряженный им конденсатор или пропуская его через резистор. Ток, создаваемый одной частицей, составляет обычно доли микроампера, а падение напряжения измеряется милливольтами. Полные потери энергии частицы при прохождении ее через камеру даются формулой:

$$E = nk,$$

где  $n$  - число образованных ионов, которое можно определить по току или падению напряжения в камере, а  $k$  — средняя энергия, необходимая для образования одной пары ионов. Величина  $k$  для обычных газов составляет около 30 эВ. Образование ионных пар - случайный процесс, а поэтому возможны флуктуации числа  $n$  порядка  $\sqrt{n}$ . Все измеренные величины, основанные на показаниях счетчика, тоже будут обнаруживать флуктуации, и поэтому точность таких измерений повышается с увеличением их длительности.

Основное требование к чувствительному веществу ионизационных приборов состоит в том, чтобы ионы, создаваемые излучением, с большой вероятностью достигали собирающих электродов. Кроме того, это вещество должно обладать высоким удельным сопротивлением, чтобы в нем не было других токов, кроме связанных с ионизацией.

Газонаполненные детекторы, такие как ионизационная камера, имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в

объёме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение.

### **Полупроводниковые рентгеновские детекторы**

Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение ( $\sim 10^2$  В). Слой полупроводника вблизи границы p-n перехода с объёмным зарядом «обеднён» носителями тока (электронами проводимости и дырками) и обладает высоким удельным электросопротивлением. К полупроводниковому кристаллу прикладывается напряжение до нескольких кэВ, что обеспечивает сбор всех зарядов, образованных частицей в объёме детектора

Заряженная частица, проникая в детектор, создаёт дополнительные электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам прибора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется.

Для регистрации заряженных частиц используют кремниевые детекторы и детекторы из сверхчистого германия (HpGe). Толщина чувствительной области кремниевых детекторов не превышает 5 мм, что соответствует пробегу протонов с энергией -30 МэВ и  $\alpha$ -частиц с энергией -120 МэВ. Для германия толщина 5 мм соответствует пробегам протонов и  $\alpha$ -частиц с энергиями -40 МэВ и -160 МэВ соответственно, более того, германиевые детекторы могут быть изготовлены с гораздо более толстой чувствительной областью. Кремниевые детекторы часто используют при комнатной температуре. Германиевые детекторы всегда охлаждают до азотных температур.

В настоящее время возник интерес к детекторам ядерных излучений на

основе тонких полупроводниковых слоев (ТПС), сформированных на поверхности монокристаллических полупроводников. В качестве базового материала используются GaAs и SiC. Основным недостатком детекторных монокристаллов - это наличие в них значительного количества дефектов различной природы, которые ухудшают характеристики детекторов. Пленочные детекторы свободны от этого недостатка.

Для регистрации рентгеновского и гамма-излучений созданы CdTe-p-n-детекторы на основе тонких полупроводниковых пленок, имеющих столбчатую структуру. Детекторы изготовлены на молибденовых подложках путем сублимирования CdTe и магнетронного распыления атомов кадмия.

В сравнении с детекторными CdTe-монокристаллами пленочные CdTe-монокристаллы имеют более совершенную структуру, так как прослойки между ними являются эффективными стоками дефектов.

Серьезным недостатком полупроводниковых детекторов является малый ток, создаваемый в них ионизирующей частицей. Он настолько мал, что для его измерения необходимы электронные усилители с большими коэффициентами усиления.

### **Пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера**

Если увеличить высокое напряжение на ионизационной камере, то электроны, возникающие при первичной ионизации, будут приобретать энергию, достаточную для вторичной ионизации, что приведет к увеличению сигнала. Детектор, работающий в таком режиме, называют пропорциональным счетчиком, поскольку импульсы напряжения, снимаемые со счетчика, пропорциональны числу первоначально возникших ионов. Число вторичных ионов, создаваемых в среднем каждым первичным ионом, зависит от напряженности электрического поля в счетчике. В плоскопараллельной камере электрическое поле однородно и его напряженность равна разности потенциалов между пластинами, деленной на расстояние между ними. В такой геометрии трудно получить поля с высокой напряженностью, необходимые для вторичной ионизации. В камерах же с центральной нитью в качестве анода, окруженной

цилиндрическим катодом, поле неравномерно и увеличивается вблизи анода. В такой геометрии удастся достичь коэффициента усиления в несколько тысяч.

При повышении напряжения на пропорциональном счетчике коэффициент усиления сигнала не возрастает до бесконечности. С какого-то момента сигнал счетчика перестает быть пропорциональным первичной ионизации и ненамного увеличивается с повышением напряжения. Прибор, работающий в таком режиме, называется счетчиком Гейгера. По конструкции он сходен с пропорциональным счетчиком. Более того, можно сконструировать счетчик, который будет работать либо как ионизационная камера, либо как пропорциональный счетчик, либо как счетчик Гейгера в зависимости от напряжения, приложенного между катодом и анодом.

Импульс тока, возникающий в счетчике Гейгера после прохождения заряженной частицы, сходен с электрическим искровым разрядом. Как и в других ионизационных приборах, основной вклад в ток вносят электроны. Присутствующие при этом в больших количествах положительные ионы электрически экранируют анод от катода и тем самым ослабляют поле, действующее на электроны. С увеличением тока экранирование усиливается и достигается насыщение, ограничивающее максимальный ток. Одновременно с насыщением протекает другой процесс - распространение разряда по всему объему счетчика Гейгера. Он обусловлен свечением разряда, свет которого производит в счетчике дополнительную ионизацию за счет фотоэффекта. Повсюду, где происходит фотоионизация, возникает новый разряд. В конечном итоге сигнал уже не зависит от первичной ионизации и может достигать 100 В. Таким образом, разряд усиливает первичный сигнал более чем в миллион раз. Для гашения разряда в счетчике Гейгера приходится принимать особые меры. Можно уменьшить внешнее напряжение и поддерживать его ниже уровня, при котором возможен устойчивый разряд, пока все ионы не будут выведены из объема счетчика. Более простой способ - ввести в счетчик пары, которые поглощали бы свет, испускаемый разрядом, и рассеивали энергию не за счет фотоэффекта, а, например, за счет диссоциации. Для этого обычно добавляют

газообразные галогены.

Недостатком данного типа детекторов является то, что их нельзя применять в вакуумных установках.

### **Сцинтилляционные и черенковские детекторы**

В современных сцинтилляционных детекторах для регистрации сцинтилляций используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), преобразующие вспышку света в электрический сигнал и одновременно усиливающие этот сигнал.

Сцинтилляционный детектор регистрирует частицы по световому излучению, вызываемому ими в кристалле. Часть светового излучения попадает в световод. Свет выбивает из фотокатода фотоэлектронного умножителя электроны, которые ускоряются и умножаются системой его динодов, создавая ток, который дополнительно усиливается.

Черенковский детектор представляет собой детектор, внешне сходный со сцинтилляционным детектором. Он регистрирует так называемое черенковское излучение - свечение, испускаемое заряженной частицей, которая движется в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде.

Черенковский счетчик, чувствительное вещество которого имеет показатель преломления  $n$ , будет реагировать на частицы, скорости которых превышают  $c/n$ . Интенсивность свечения пропорциональна величине  $(1 - v^2/c^2n^2)$ , которая равна нулю при пороговом значении скорости  $c/n$  и быстро возрастает до максимального значения, когда скорость  $v$  регистрируемой частицы приближается к скорости света  $c$ . Особенность черенковского излучения состоит в том, что оно сосредоточено в переднем конусе относительно направления движения частицы. Угол при вершине конуса дается выражением:

$$\cos\theta = v/cn.$$

Используя эту зависимость угла испускания от скорости, можно сконструировать счетчик, на катоде ФЭУ которого будет фокусироваться только излучение частиц, движущихся с определенной скоростью.

Световая вспышка черенковского излучения по интенсивности примерно

в 100 раз слабее сцинтилляции. Поэтому при выборе чувствительного вещества для черенковского счетчика приходится ограничиваться материалами, в которых не происходят сцинтилляции. Обычно это вода и оргстекло. Для регистрации частиц со скоростями, приближающимися к скорости света, используются газы, показатель преломления которых очень близок к 1.

### **Активно-пиксельные датчики**

В настоящее время начинают использоваться активные пиксельные датчики CMOS APS (CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor, APS Active Pixel Sensor), основанные на сенсорах, созданных на комплиментарных структурах металл-окисел-полупроводник (КМОП).

Каждый пиксель активно-пиксельного сенсора изображения содержит не только фотодетекторный элемент, но также и активно-транзисторную схему («обвязку») для считывания сигнала с пикселя. Технология КМОП позволяет интегрировать всю систему формирования изображения, включая массив светочувствительных элементов и управляющие схемы, на одном кристалле кремния.

При открытом затворе фотоны собираются на сенсоре, то есть происходит накопление фотонов в каждом пикселе датчика - при помощи линзы, установленной на каждом пикселе, концентрируются в фоточувствительную область пикселя. При этом происходит фильтрация цвета, то есть в одном пикселе происходит накапливание красных фотонов, в другом - синих и в третьем - зеленых. Фотон, попадая на фотодетектор фотодиода, выбивает электроны, которые накапливаются в, так называемых, потенциальных ямах, накопленные электроны создают разность потенциалов. По синхронизирующим сигналам с генератора импульсов происходит одновременное считывание накопленных зарядов - всех или из отдельных пикселей, указанных оператором. Полученный сигнал слишком мал для самостоятельного использования, поэтому он проходит через усилитель. После этого происходит обработка аналогового сигнала и преобразование аналогового сигнала в цифровой. Затем в цифровом процессоре сигналов или с помощью специального программного обеспечения

происходит интерполяция и коррекция цветов, разумеется, если рассматриваемая нами камера не является монохромной. Затем полученные данные преобразуются в формат, с которым можно работать пользователю, и выводятся на экран монитора, либо записываются на электронно-магнитные носители.

Датчики с активными пикселями можно подразделить на типы:

- MAPS - Monolithic Active Pixel Sensor
- HAPS - Hybrid Active Pixel Sensor

MAPS-детектор изготавливается так, что электроника считывания изображения и управления интегрированы на одном чипе. Представитель этого семейства - описанный ниже датчик MIMOSA.

HAPS-приборы состоят из нескольких чипов, которые выполняют различные функции; например, один чип содержит матрицу пикселей, другой усиливает сигнал и т.д. Прибор, построенный по такому принципу, - это рентгеновский датчик, использующий матрицу DEPFET.

Датчик DEPFET является датчиком рентгеновского излучения, который принадлежит семейству КМОП и позволяет измерить положение, время прибытия и энергию с достаточно высокой точностью в диапазоне от 0.1 до 30 keV. DEpleted P-channel Field Effect Transistor (DEPFET) является низкошумовым пиксельным датчиком.

Этот прибор относится к семейству HAPS и для него используется DEPFET-матрица размером 64x64 пикселей. Размер одного пикселя 50x60 мкм. Чувствительная область этого прибора составляет 3.2x3.84 мм. Обычный цикл считывания информации со всех 4096 пикселей составляет около 1 мс.

Главным недостатком активно-пиксельной технологии являются помехи, возникающие из-за добавления дополнительных элементов на чип. Это - транзисторные и диодные рассеивания, эффект остаточного заряда и многие другие.

## **Вывод**

У сцинтилляционных детекторов имеется ряд преимуществ перед другими детекторами частиц. Твердые и жидкие сцинтилляционные материалы в тысячи раз плотнее газов, используемых в ионизационных счетчиках. Соответственно этому значительно возрастают потери энергии ионизирующей частицей на единицу длины и сигнала. Кроме того, ФЭУ обеспечивают такое усиление первичного сигнала, которого не достичь с помощью электронных схем.

## **Библиографический список:**

1. Определение координаты стыка при электронно-лучевой сварке по информационным параметрам сигнала датчика стыка / А.В. Мурыгин, СВ. Балайтисов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева / Под ред. проф. Г.П. Белякова, СибГАУ. - Вып. 6. - Красноярск, 2005. - с. 224 - 227.

2. Разработка помехозащищенных измерительных устройств определения положения луча относительно стыка при ЭЛС: Автореф. канд. диссертации: 05.03.06 / А.В. Мурыгин. - Ленинградский технический университет, - 1991.

3. Лаптенко, В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой: Автореф. докт. диссертации: 05.13.01, 05.13.07 / Сибирская аэрокосмическая академия, Красноярск, - 1997.

4. Об использовании рентгеновских датчиков в системах направления электронного пучка по стыку / Е.Н. Баня, Ф.Н. Киселевский, О.К. Назаренко // Материалы 5-ой Всесоюзной конференции по электроннолучевой сварке. - Киев: Нау к. думка, 1977. - с. 126 -128.

5. Mauer K.O. Systems for beam positioning in electron beam welding. Schweisstechnik. 1982. Vol. 32. No 8. P. 368–373.

6. Тэрэда, Ура. Исследования способа обнаружения границы проплавления при электронно-лучевой сварке / Ура Тэрэда: Перев. с япон. ТТП Москвы № 19263 от 29.11.87.

7. Установка для электронно-лучевой сварки с программным управлением от ЭВМ для авиационной промышленности / К. Хара и др. // Пер. с яп. ВЦП № М-03756 от 12.02.1986.

8. Рыкалин, Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов - М.: Машиностроение, 1978. - 239 с.

9. Тихоненко, Д.В. Рентгеновские датчики для систем управления электроннолучевой сварки / Д.В. Тихоненко, А.В. Мурыгин, А.Н. Бочаров // Материалы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (11-12 нояб. 2004, г. Красноярск) / СибГАУ. Красноярск, 2004. - 302 с.

10. Онуэ, Х. Современное состояние и перспективы дальнейшего промышленного внедрения электронно-лучевой сварки / Х. Онуэ // Пер. с яп. КР ВЦП №КН-01205 от 01.04.87.

11. Cooper J.C., Previs A., Schumacher B.W. Closed-loop beam Position controller for electron beam welding // DVS-Ber. 1980. Vol. 63. P. 20–25.

12. Pat. 1585918 Great Britan, MKU B 23K 15/00. A method of setting a path for a charge carrier beam of charge carrier beam apparatus and charge carrier beam apparatus with means for carrying out the method / W. Scheffels. Publ. 11.03.1981.