

Полупроводниковые дозиметрические детекторы

Введение

Применение полупроводников в качестве дозиметрических детекторов основано на их способности регистрировать ионизирующие частицы. В природе имеется огромное количество соединений, минералов и чистых элементов, которые относятся к классу полупроводников, но лишь немногие из них нашли применение для регистрации ионизирующих излучений.

Общим признаком полупроводников является значение их электрической проводимости, которое занимает промежуточное место между электрической проводимостью диэлектриков и проводников. С точки зрения зонной теории полупроводниковыми свойствами обладают такие вещества, ширина запрещенной зоны которых не превышает 2—3 эВ. У диэлектриков запрещенная зона значительно шире, у металлов она практически отсутствует.

Полупроводник в качестве счетчика элементарных частиц выступает как аналог импульсной ионизационной камеры, но в основе работы счетчика лежит ионизация атомов твердого тела. По сравнению с газовыми ионизационными детекторами полупроводниковые счетчики имеют особенности, которые определяют их преимущества и недостатки и возможность использования для дозиметрии.

Носители заряда в полупроводнике

Носителями электрических зарядов в полупроводнике могут быть электроны, дырки и ионы кристаллической решетки. Все они могут участвовать в создании электрического тока. Свободные электроны создают ток путем непосредственного перемещения от катода к аноду. Перемещение дырок происходит иначе. Каждая отдельно взятая дырка сама по себе не перемещается. Появление дырок — это появление одного свободного состояния в распределении электронов по состояниям валентной зоны. Наличие таких свободных состояний позволяет электронам перемещаться против электрического поля, в результате чего можно сказать, что дырки перемещаются по полю.

Появление свободных носителей электрических зарядов в полупроводнике может быть вызвано:

- 1) переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости вследствие энергии теплового движения. Одновременно появляются дырки в валентной зоне;
- 2) переходам электронов в зону проводимости и образованием дырок в валентной зоне вследствие поглощения энергии ионизирующего излучения. Число возникающих при этом носителей служит мерой дозы излучения;
- 3) ионизацией примесей.

Полупроводники, электрическая проводимость которых обусловлена переходами электронов из заполненной, валентной зоны в зону проводимости, называются собственными полупроводниками. Полупроводники, электрическая проводимость которых обусловлена ионизацией примеси, называются примесными.

Примесные полупроводники

Примеси увеличивают электрическую проводимость полупроводника, так как повышается число носителей электрических зарядов. Однако примеси не только увеличивают общее число носителей, но и могут изменить соотношение между концентрациями n и p так, что число положительных и отрицательных зарядов окажется неодинаковым.

Если донорная примесь обуславливает электронный механизм электрической проводимости. Такие полупроводники называются электронными, или полупроводниками n -типа.

В случае когда электрическая проводимость обусловлена преимущественно дырками такие полупроводники называются дырочными, или полупроводниками p -типа. Основными носителями в полупроводниках p -типа являются дырки, а неосновными — электроны.

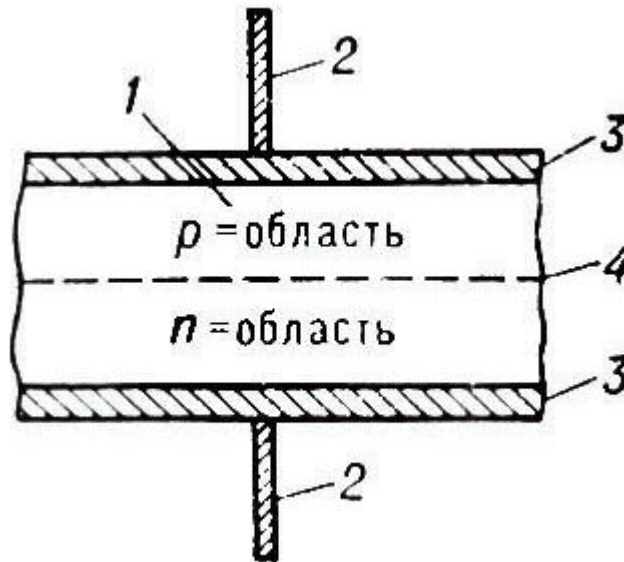
p-n переход

Переходом называется область полупроводника, где происходит смена типа проводимости, например, с электронной на дырочную или, наоборот, с дырочной на электронную.

Укажем наиболее важные особенности p-n-перехода.

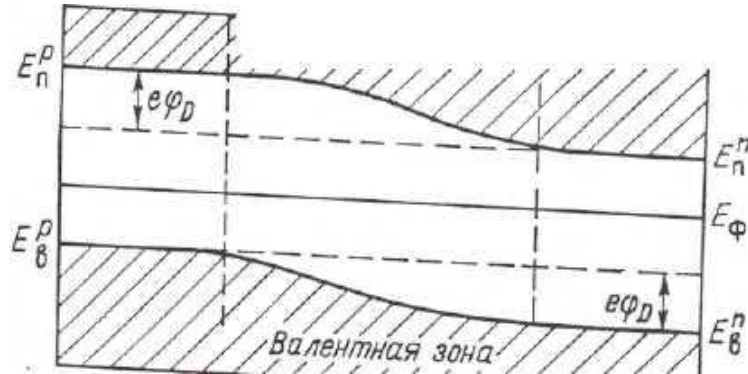
- В области p—n-перехода концентрация равновесных носителей зарядов на несколько порядков ниже, чем в остальном объеме кристалла. Следовательно, p-n-переход обладает значительно более высоким сопротивлением. Обедненная носителями область p—n-перехода является основной рабочей областью полупроводникового детектора.
- Переходы могут быть симметричными или несимметричными. В симметричных переходах концентрация основных носителей в обеих областях примерно одинакова, т. е. $p_p = n_n$.
- Положительные заряды в p—n-переходе сосредоточены у границы p-слоя в очень узкой области, а отрицательные — распределены равномерно по всему переходу. Это приводит к неоднородности электрического поля, созданного пространственным зарядом в переходе, величина которого максимальна у границы n-области.

Схема полупроводника с р-п переходом



- 1-полупроводник
- 2-выводы
- 3-корпус
- 4- область р-п перехода

p-n переход



Структура энергетических уровней p-n перехода

$$h \approx \sqrt{\rho U}$$

Ширина области перехода,
ρ- удельное сопротивление
U – потенциал смещения

Вольт – амперная характеристика

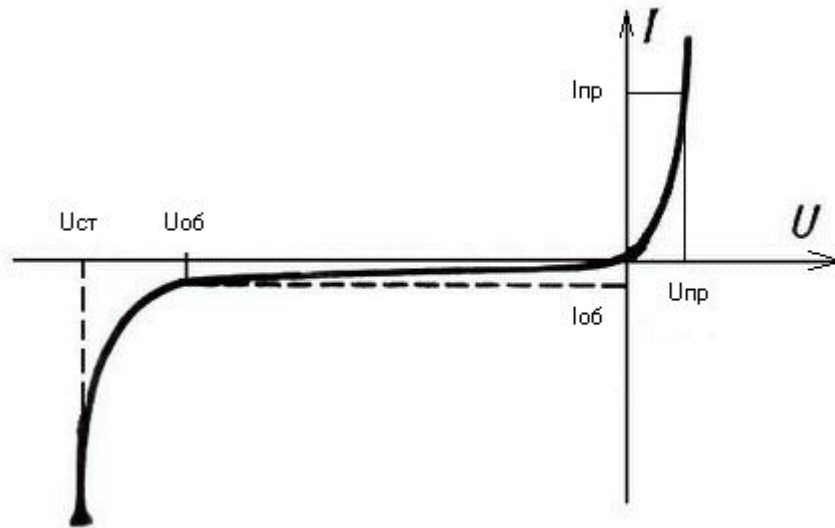
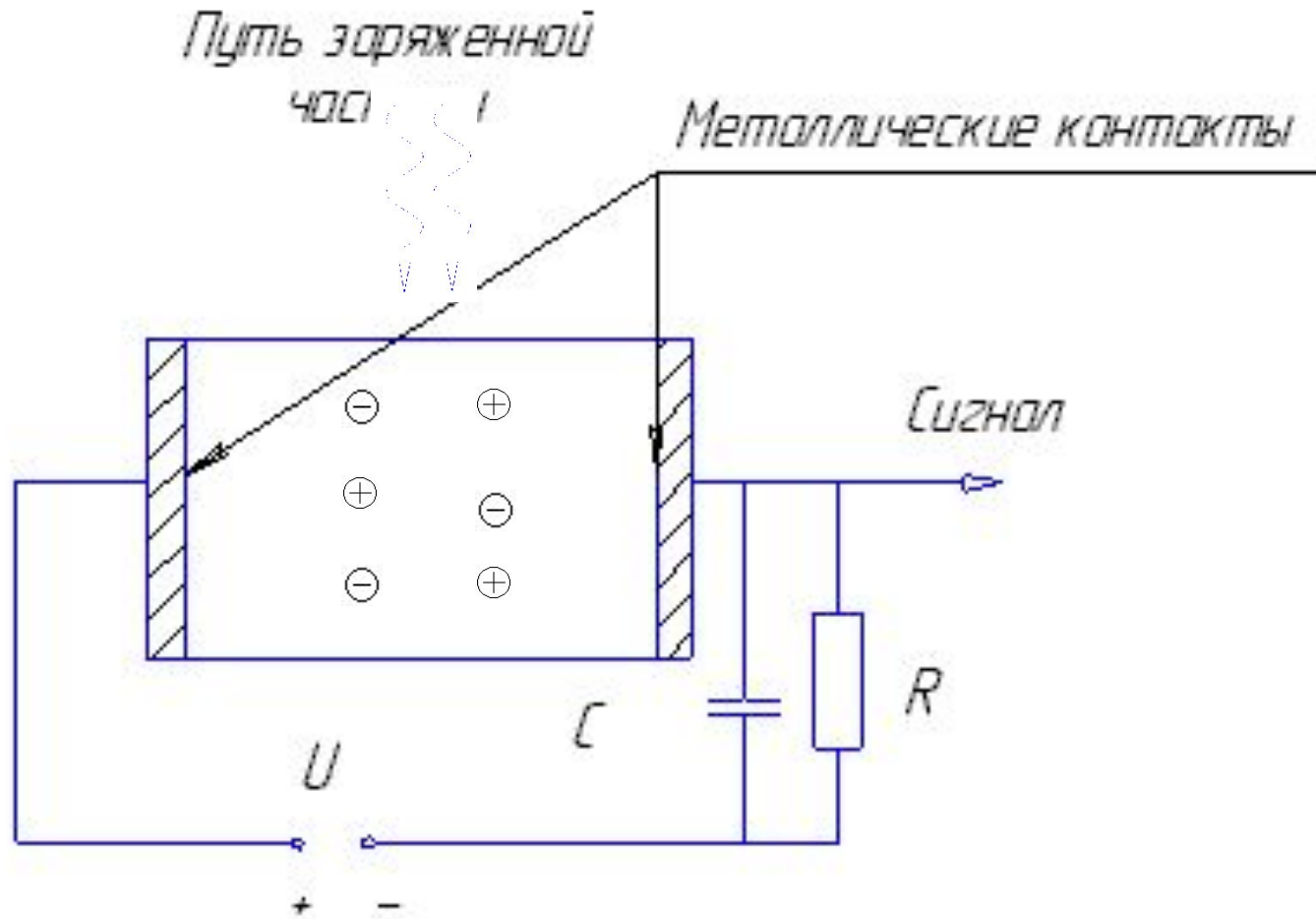


Рис 2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода с р-п — переходом
 $U_{ст}$ – напряжение стабилизации
 $I_{пр}$, $U_{пр}$ – прямой ток и соответствующее ему напряжение
 $I_{об}$, $U_{об}$ – обратный ток и соответствующее ему напряжение

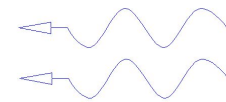
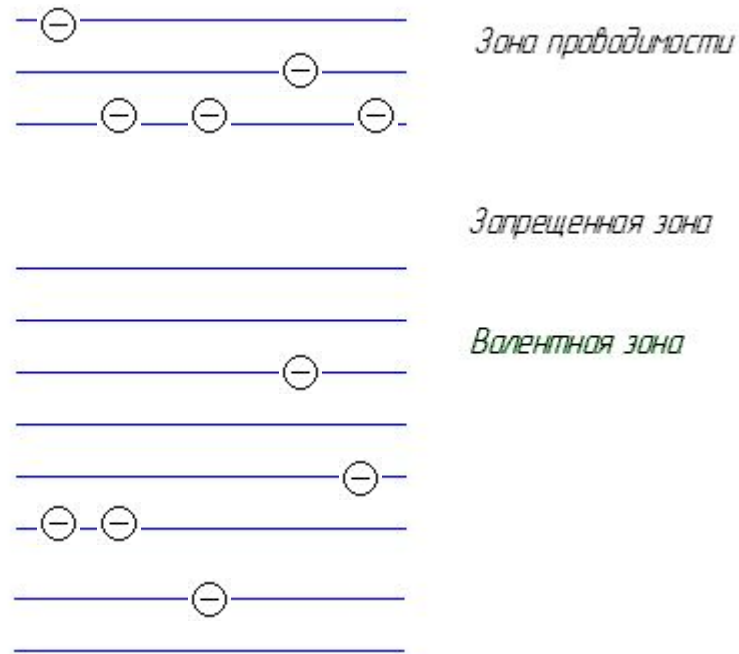
Схема включения полупроводникового детектора



Образование носителей заряда в полупроводнике под действием ионизирующего излучения

В полупроводнике при прохождении ионизирующей частицы возникают быстрые электроны, которые в каскадном процессе ударной ионизации выбивают электроны из различных энергетических зон, в том числе и самых глубоких. Этот процесс продолжается пока энергия электронов не станет порядка $1.5E_g$. Первая стадия процесса, когда в зонах обычно не занятых появляются электроны, а в заполненных – дырки длится около 10^{-12} сек. Во второй стадии в результате различных взаимодействий электронов с решеткой кристалла электроны падают на дно зоны проводимости, а дырки поднимаются к верхнему краю валентной зоны. Вторая стадия также занимает 10^{-12} сек.

Образование носителей в полупроводнике под действием излучения



Преимущества и недостатки полупроводниковых дозиметров

Преимущества полупроводниковых детекторов:

высокое временное разрешение

высокая чувствительность

малыми габаритами

низким внешним напряжением.

Недостатки: сложная технология изготовления

необходимость иметь предельно чистые исходные материалы

фоновые явления

зависимостью от условий среды.

Дозиметрические характеристики Счетчиковый режим

Полупроводниковый детектор с р-п-переходом в счетчиковом режиме аналогичен импульсной ионизационной камере. Есть, однако, существенные различия

Во-первых, число носителей заряда, образованных ионизирующей частицей в веществе полупроводника, может оказаться сравнимым с флюктуациями числа свободных носителей, обычно присутствующих в чувствительном объеме; возникает проблема шумов (собственного фона), которая практически отсутствует при работе с обычными ионизационными камерами.

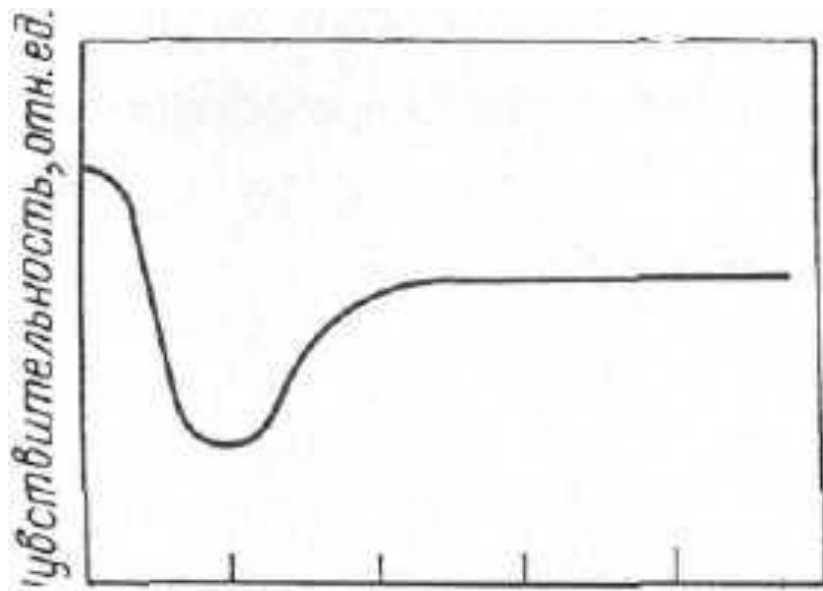
Во-вторых, чувствительная область детектора, как правило, не распространяется на весь объем полупроводника. Когда ионизирующая частица проходит через чувствительную область перехода, вновь образованные носители заряда уносятся электрическим полем на электроды за время, исчисляемое долями микросекунд.

Токовый режим

При высокой мощности дозы счетно-импульсный метод становится непрактичным из-за слишком большой скорости счета.

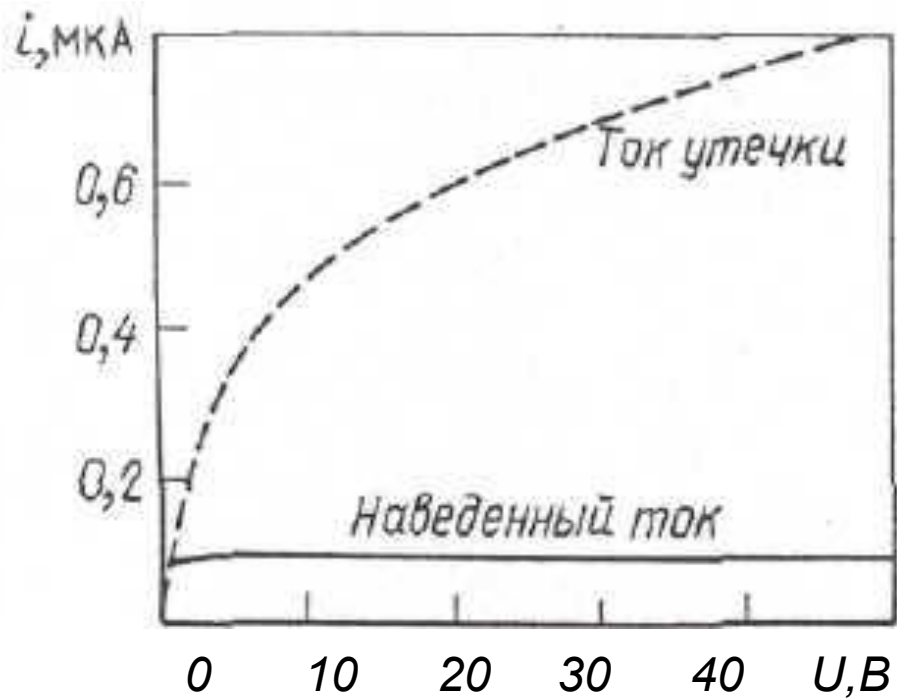
В дозиметре с р-n-переходом при обратном смещении наблюдается ток утечки, зависящий от напряжения смещения и температуры. Под действием ионизирующего излучения концентрация неосновных носителей возрастает и ток, протекающий через переход, увеличивается. Дополнительные носители могут возникнуть как в обедненной зоне, так и в соседних областях в пределах диффузионной длины. Все они в конечном счете вносят свой вклад в ток в зависимости от постоянной времени системы.

Ток, вызванный излучением, практически не зависит от напряжения смещения, за исключением самого начального участка. Это объясняется тем, что время жизни неосновных носителей было достаточно велико, так что диффузионная длина превышала размеры кристалла. В результате на электроды собрались все носители из полного объема детектора. Этот своеобразный ток насыщения нельзя, однако, использовать для измерения низкой мощности дозы, так как соответствующий ток утечки превосходит его в несколько раз.



0 200 400 600 800
энергия частиц кэв

Дозовая чувствительность
дозиметра на основе
кремния



Вольт- амперная
характеристика
полупроводникового
дозиметра в поле фотонного
излучения

ФОНОВЫЙ ТОК

При напряжении U фоновый ток $i=U/R$. Пусть ионизирующая частица образовала N зарядов в детекторе. Число фоновых зарядов попавших за время τ - N_{ϕ} τ - время собирания заряда.

$$N_{\phi} = i \tau / e = U \tau / eR$$

$$\lambda = \frac{N}{\sqrt{N_{\phi}}} = \frac{N}{\sqrt{eR / U\tau}}$$

При наличии фонового тока лучше регистрируются сильноионизирующие частицы

Кремниевые дозиметрические детекторы работают в режиме короткого замыкания

$$j = aPL$$

Где j - ток короткого замыкания

P - мощность дозы излучения

L - диффузионная длина

По мере накопления дозы D накапливаются радиационные дефекты и регистрируемый ток j становится меньше исходного j_0

$$j = j_0 \sqrt{\frac{1}{1 + j_0 \lambda D}}$$

Полупроводниковые детекторы применяются:
в медицине
в промышленности

Характеристики полупроводниковых материалов

Полупроводник	Ширина Запрещенной Зоны при 300К, эВ	Энергия Образования Одной электронно – Дырочной пары	Атомный Номер	Подвижность При 300 К. См ² /(В*с)		Время жизни, с		
				Элект- ронов	дырок	Электр- ронов р-тип	Дырок n-тип	
Кремний	1.08	3.6	14	1500	500	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	
Германий	0.67	2.94	32	3800	1800	10^{-3}	10^{-3}	
Алмаз	6	10	6	1800	1200	-	-	
Селенид кадмия	1.7	-	48.34	200	-	$10^{-2}-10^{-3}$	-	
Сульфид кадмия	2.4	7.3	48.16	300	10	10^{-3}	$<10^{-8}$	
Арсенид галлия	1.43	6.3	31.33	8500	420	10^{-7}	10^{-7}	
Сурьмид галлия	0.67	-	31.51	4000	1400	10^{-8}	10^{-8}	
Фосфид Индия	1.25	-	49.15	4800	150	-	-	
Арсенид индия	0.4	-	49.33	2000	240	-	-	
Сурьмид индия	9.17	0.6	49.51	78000	750	10^{-7}	10^{-7}	
Сульфид свинца	0.37	-	82.16	400	600	$2 \cdot 10^{-5}$	-	

Современные приборы основанные на полупроводниковом методе

СЕГ-002-«АКП-П»

СОСТАВ

Детектор энергии гамма-излучения р-

типа на основе HP(Ge)

Пассивная низкофоновая композиционная защита детектора.

Спектрометрический тракт.

Амплитудно-цифровой преобразователь АПЦ.

IBM-совместимый компьютер.

Программное обеспечение «AKWin».

Комплекты кабелей.

Устройство для заливки азота.

Датчик уровня азота.

Измерительные сосуды.



Технические характеристики

Предназначен для идентификации радионуклидов в сложной смеси изотопов в счетном образце, определения их удельной активности или относительного содержания по спектру внешнего гамма-излучения.

- Блок детектирования типа БДЕГ БДЕГ - 35 190
- Диапазон измеряемых энергий гамма-излучения, кэВ 0 – 10 000
- Эффективность регистрации, % к NaJ >35
- Энергетическое разрешение:
 - для 122 кэВ, эВ 875
 - для 1.3 МэВ, кэВ 1.9
- Отношение пик/комpton 60:1
- Автоматический подъем напряжения, В 0-4000
- Толщина свинца пассивной защиты, мм 100
- Экран от К-альфа свинца
 - медь, мм 0.1
 - кадмий, мм 0.1

Дозиметр ДКГ-05Д

Предназначен для контроля и оптимизации дозовой нагрузки на персонал. Широкий диапазон измеряемых доз и мощностей дозы обеспечивают применение дозиметра для оперативного, текущего и аварийного индивидуального дозиметрического контроля



Технические характеристики

Детекторы	кремниевые полупроводниковые
Диапазон измерения: дозы Нр(10), мкЗв (шаг установки порогов) мощности дозы Нр(10), мкЗв/ч	0,5-15·10 ⁶ (1 мкЗв) 1-10 ⁷ (1 мкЗв/ч)
Энергетический диапазон, МэВ	0,05 - 3,0
Время измерения мощности дозы (уменьшается с ростом мощности дозы), с	255... 1
Температурный диапазон, °С: с индикацией результатов измерения без индикации (запись результатов в память)	-20...+50 -30...+50
Допустимая влажность, %	до 96
Время непрерывной работы без подзарядки аккумулятора, ч, не менее	200
Габариты, мм	140x61x30
Масса, г	110
Герметичный корпус из ударопрочной пластмассы.	

Список литературы

1. Иванов И.В. Курс дозиметрии.
2. Кашковский В.В. Специальный физический практикум.
3. <http://www.rubikon.com>
4. <http://www.akp.kiev.ua>
5. <http://www.isotop.ru>