

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бунтина Ирина Дмитриевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Деграация вольт-амперных характеристик пин-диода в зависимости
от поглощенной дозы рентгеновского излучения**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20312

Научный руководитель:

Я. В. Ракшун

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А. С. Кудрявцев

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Цель – оценить принципиальную возможность длительного использования таких пин-фотодиодов на пучках СИ.

Основной задачей было исследование зависимости деградации вольтамперных характеристик пин-фотодиода (ВАХ) от поглощённой дозы ионизирующего излучения.

Работа выполнялась на технологической станции ВЭПП-4. Объект исследования - пин-фотодиод, подготовленный институтом полупроводников имени Ржанова ИФП СО РАН.

В процессе работы проводилось измерение ВАХ без пучка, в определенные периоды времени после действия монохроматических пучков с энергией 9 кэВ, и после воздействия белого пучка СИ, в течении 30 минут.

В рамках работы была изучена деградация пин-фотодиода при воздействии на него монохроматического и белого пучка СИ, показано, что несмотря на внешние признаки воздействия пучка, характеристики пучка практически не изменились. Значит данный пин-диод пригоден для выполнения измерений в монохроматических пучках СИ и, по крайней мере, для кратковременного использования в белых пучках СИ.

Оглавление.

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть:	
2.1 Зонная структура полупроводника.....	5
2.2 PIN-фотодиод и его принцип действия.....	6
2.3 Деграация полупроводников под действием СИ.....	7
3. Экспериментальная установка и регистрация сигнала.....	8
4. Методика расчётов.....	11
5. Результаты и их обсуждение.....	12
6. Выводы.....	15
7. Список литературы.....	16

1. Введение

Источники синхротронного излучения (СИ) для прикладного использования, появившиеся сравнительно недавно, стали очень существенным дополнением к генераторам рентгеновских лучей, которые служат человечеству уже более сотни лет. Не очень долгая история прикладного использования СИ в разных областях исследований не только привела потребителей к замене обычных рентгеновских лучей более ярким синхротронным излучением, но выявила ряд направлений, в которых результаты могут быть получены только с помощью этого излучения. Такими областями стали исследования физических и химических процессов в реальном времени и изучение структуры объектов субмикронных размеров, а также практическое применение синхротронного излучения в технологии материалов и в приборостроении.

Так как рентгеновское излучение описывается с помощью корпускулярно-волнового формализма, то его принято характеризовать либо длиной волны λ (в Å или в нм, $1 \text{ нм} = 10 \text{ Å}$), либо энергией фотонов ϵ (эВ). Между этими характеристиками существует строгое соответствие, следующее из формулы Планка $\epsilon = h\nu$,

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{\epsilon}$$

где ν – частота колебаний электромагнитной волны [с^{-1}], постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ (Дж * с), скорость света $c = 2,998 \cdot 10^8$ (м/с).

Рентгеновское излучение обладает рядом физических свойств, имеющих прямое отношение к исследованию в данной работе: достаточно высокая глубина проникновения в вещество; способность вызывать фотоэффект (выбивание электронов из облучаемого вещества). Кроме того, излучение из синхротронных источников достаточно легко моделируется, поэтому вполне подходит для извлечения количественной информации о свойствах объектов с заданной точностью и достоверностью (т. е. решения метрологических задач).

Данная работа посвящена исследованию зависимости деградации вольтамперных характеристик пин-фотодиода (ВАХ) от поглощённой дозы

ионизирующего излучения. Объект изучения был создан в Институте полупроводников имени Ржанова СО РАН. Основная цель – оценить принципиальную возможность длительного использования таких пин-фотодиодов на пучках СИ. В рамках работы выполнен ряд следующих задач:

1. Ознакомиться с принципами работы пин-диодов.
2. Выполнить экспериментальные работы на пучках СИ (измерить ВАХ пин-фотодиода после воздействия пучками).
3. Произвести расчёты поглощённой дозы ионизирующего излучения.
4. На основе полученных данных сделать вывод о влиянии радиационного излучения на физические свойства пин-фотодиода.

2. Теоретическая часть.

Рассмотрим основы полупроводниковой теории, принцип работы пин-фотодиода и механизма радиационной деградации полупроводников.

2.1 Зонная структура полупроводника.

Область собственной проводимости полупроводников – это область, в которой на электрические свойства полупроводника примеси в кристалле не оказывают существенного влияния.

При абсолютном нуле проводимость отсутствует, т. к. в зоне проводимости все уровни свободны. Она отделена от заполненной валентной зоны энергетической щелью шириной E_g (рис. 1). По мере возрастания температуры электроны валентной зоны из-за термического возбуждения будут переходить в зону проводимости.

При температурах ниже области собственной проводимости, электрические свойства определяются

примесями, это *примесная (несобственная) проводимость*.

Введём некоторые понятия:



Рис. 1. Схема энергетических зон, поясняющая явление собственной проводимости в полупроводнике

Прямой оптический переход (а), фотон поглощается кристаллом с образованием электрона и дырки. При процессе k практически не изменяется, т. к. поглощаемый фотон имеет очень малый волновой вектор. Пороговая частота ω_g для поглощения определяется величиной энергетической щели $E_g = \hbar\omega_g$.

Непрямой оптический переход (б), происходит с участием фотона и фонона, поскольку края валентной зоны и зоны проводимости удалены друг от друга в k -пространстве. Пороговая энергия поглощения $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$, где Ω - частота излученного фонона с волновым вектором $K \sim -k_c$, где k_c – расстояние между энергетическими минимумами. При высоких температурах уже появляются фононы, при чём если фотон поглощается одновременно с фононом, пороговая энергия $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$.

2.2 PIN-фотодиод и его принцип действия.

PIN-диод — это полупроводник, в котором между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственный слой (i-область). Слои n и p пин-фотодиода имеют высокую проводимость и очень малое удельное сопротивление – около 1 Ом/см; i – слой же, напротив, имеет большой диапазон удельного сопротивления – от 10 Ом/см до 100 кОм/см.

На такой диод подается обратное смещение ($-U$), т.е. напряжение плюсом к n-переходу, минусом к p-переходу, затем пин-фотодиод облучается фотонами (рис. 2).

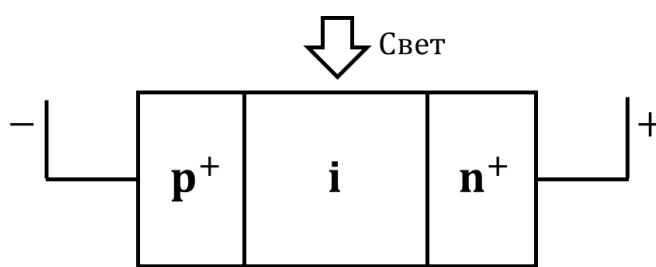


Рис. 2. Устройство p-i-n фотодиода

Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического тока создается в i-слое. Но так как свободных носителей в i-слое нет, нет и электрического тока (в идеальном случае), однако, при попадании излучения на i-слой, в нем образуется свободные электронно-дырочные пары. Эти пары под действием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных

направлениях к своим электродам. Таким образом, создается фототок (ток дрейфа).

Эффективным является взаимодействие излучения только с i - слоем, так как при попадании фотонов в p^+ - и n^+ - слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать p^+ - и n^+ - слои как можно тоньше, а обедненную область больше, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет.

2.3 Деградация полупроводников под действием СИ.

Воздействие различных видов радиационного излучения на кристаллическую структуру полупроводника ведёт к образованию радиационных эффектов, которые можно свести к двум основным видам:

1. Эффект смещения – обусловлен смещением атомов из своего нормального положения и вызывает долговременные обратимые и необратимые нарушения кристаллической решётки полупроводника;

2. Эффект ионизации – происходит образование свободных носителей заряда и фототоков, этот эффект обычно является кратковременным и обратимым.

Накапливающиеся при облучении в полупроводниковых структурах радиационные дефекты приводят к деградации электронных характеристик полупроводниковых приборов и, в конечном счёте, к их выходу из строя. Радиационные дефекты можно условно разделить на: точечные – таким структурным нарушениям в первую очередь относится один из простейших и самых распространённых радиационных дефектов – точечный дефект Френкеля, который представляет из себя совокупность атома в междоузлии и пустого узла (вакансии) и точечный дефект Шоттки, который представляет из себя вакансию атома кристаллической решетки(образование этого дефекта может происходить из-за того, что при облучении, отдельные атомы перемещаются либо к поверхности кристалла, либо к внутрикристаллической границе, а вакансии уходят вглубь кристалла).

Воздействие радиации на полупроводниковый прибор зависит от его конструктивных особенностей, вида материала, удельного сопротивления, а также от того, какой эффект использован в качестве основы его работы. Основными радиационными дефектами в диодах являются: изменение сопротивления полупроводника; фототоки (на один или два порядка больше рабочих токов); время жизни носителей заряда.

3. Экспериментальная установка и регистрация сигнала.

Эксперимент проводился на технологической станции (ТС) ВЭПП-4. Станция расположена на выходе поворотного магнита ВЭПП-4.

Введём определения, нужные нам для описания установки:

Монохроматор — спектральный оптико-механический прибор, предназначенный для выделения монохроматического излучения (обладающего очень малым разбросом частот, в идеале – одной частотой (длиной волны)). Принцип работы основан на дисперсии света, а значит выполняется закон Брэгга об отражении монохроматической волны от кристаллической решётки:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

где d — межплоскостное расстояние, θ — угол скольжения (брэгговский угол), n — порядок дифракционного максимума, λ — длина волны.

В ходе эксперимента геометрические параметры пучка СИ были заданы при помощи щелей из тантала (Ta). После щелей пучок излучения попадал на монохроматор Si(111) (кремний с индексами Миллера $h = 1$, $k = 1$, $l = 1$), который определял длину волны прошедшего излучения в эксперименте, и был расположен на гониометре. Под это излучение помещался пин-фотодиод.

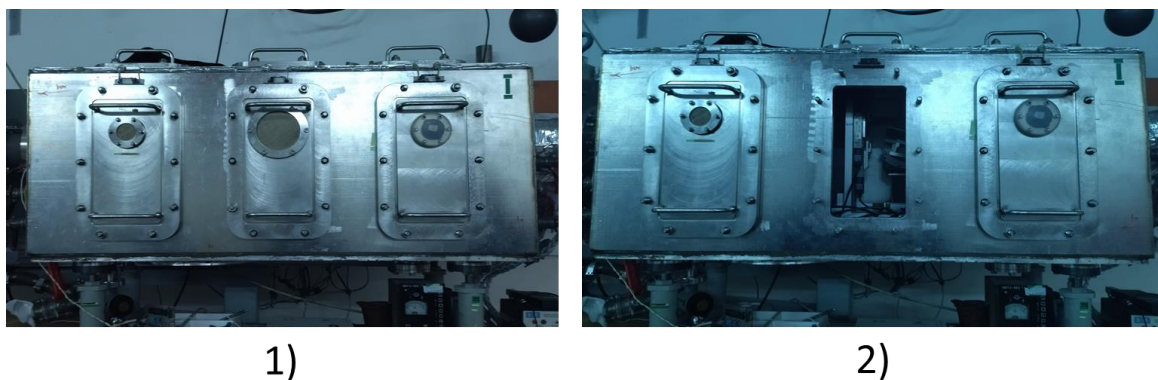


Рис. 3. Фото экспериментальной установки в двух состояниях: 1) закрытые фланцы; 2) открытые фланцы

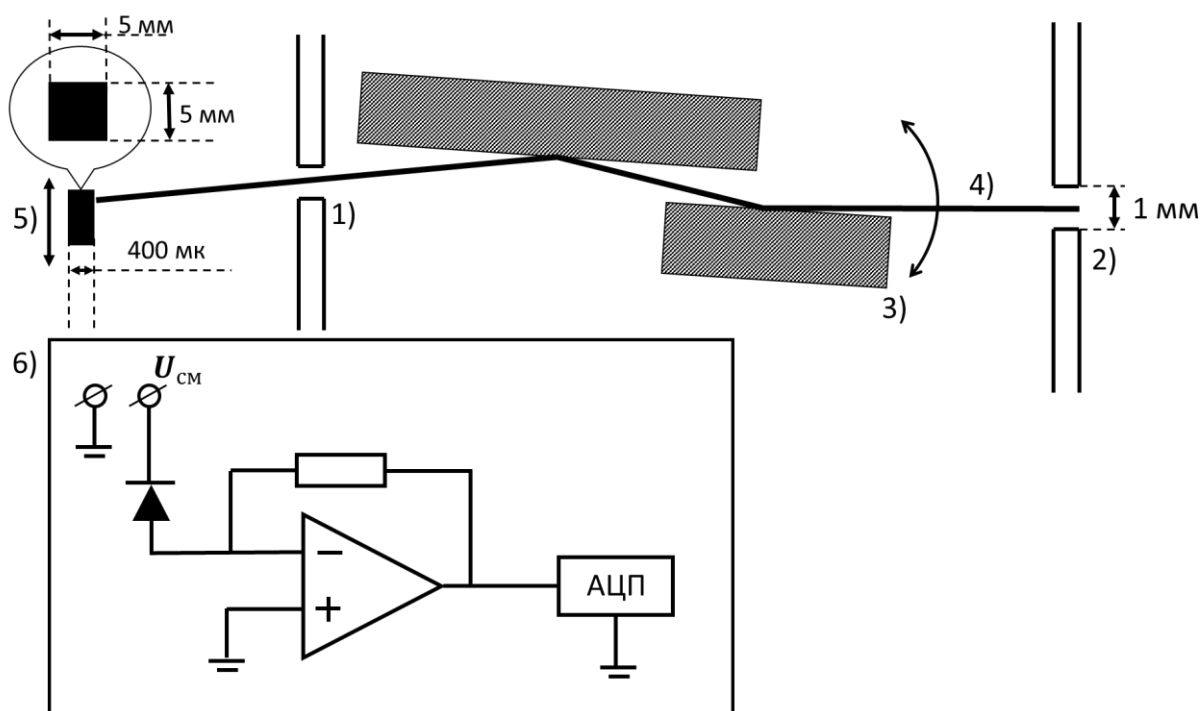


Рис. 4. Схема установки: 1) горизонтальная щель, 2) вертикальная щель, 3) монохроматор, 4) синхротронный пучок, 5) пин-фотодиод, 6) упрощённая электрическая схема подключенных к пин-фотодиоду элементов

Радиотехническая схема установки (рис. 4) содержит в себе источник напряжения смещения, пин-фотодиод и операционный усилитель, который усиливает сигнал пин-диода и преобразует фототок диода в выходное напряжение, а также аналогово-цифровой преобразователь, с помощью которого производились расчёты.

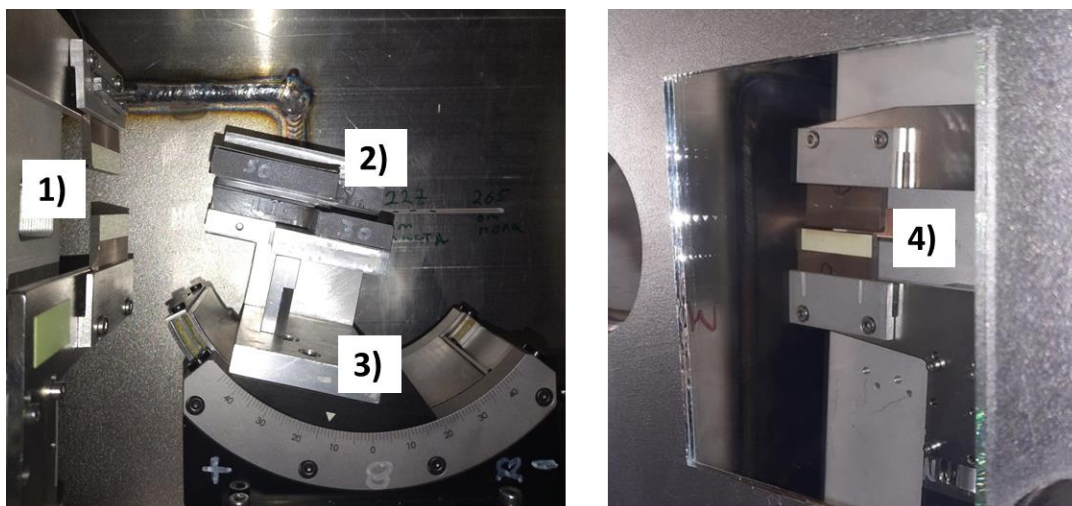


Рис. 5. Оборудование камер. Цифрами обозначены элементы: 1),4) оптические ножи; 2) монохроматор; 3) гониометр

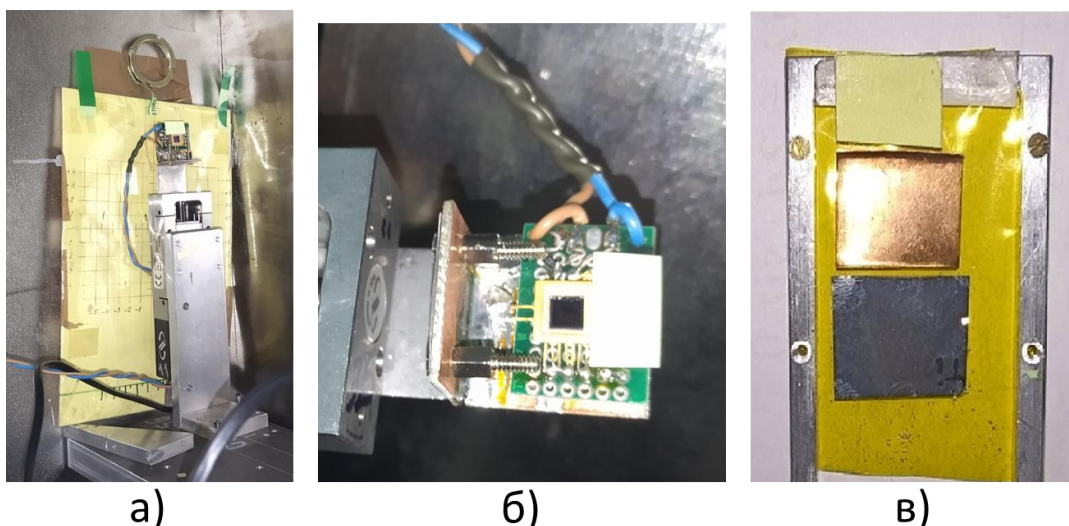


Рис. 6. Фото: а),б) исследуемого пин-фотодиода; в) использовавшейся медной фольги

Шаги выполнения работы:

1) Калибровка установки

Перед регистрацией сигнала, первым делом, нужно было откалибровать подвижки, и определить угол монохроматора при известной энергии пучка. Для этого под СИ помещалась медная фольга, регистрировался сигнал, и методом нахождения К-края поглощения, зная положение нуля на гониометре, определялся угол из условия Брэгга-Вульфа (1) (К-край поглощения меди равен 8,976 кэВ):

$$\theta = \arcsin \frac{12,39841}{2Ed} \frac{180}{\pi} = 12,72^\circ$$

2) Измерение

Эксперимент длился 1.5 часа, первый час пин-фотодиод облучался монохроматическим излучением, последние пол часа белым пучком (БП – немонохроматическое излучение).

В начальный момент времени и через каждые последующие 30 минут снимались значения ВАХ при включённом пучке, и ВАХ темнового тока, чтобы в будущем найти чистый сигнал, а также на протяжении 30 минут снималось, как менялся фототок от времени.

В последние пол часа был снят скан пин-фотодиода по вертикали до облучения БП и после него, для определения изменения однородности объекта исследования. Значения ВАХ не были записаны по причине большой мощности БП, из-за которой сигнал не помещался в диапазон значений АЦП.

4. Методика расчётов.

1) Вольтамперная характеристика.

На каждое значение напряжения смещения существует набор точек, из которых находили среднее значение и среднеквадратичное отклонение (для измерения погрешности измерений). Производили деление на 300 кОм – сопротивление обратной связи, чтобы найти фототок. После чего, то же считали для ВАХ темнового тока, снятое в тот же момент времени. Необходимо проинтерполировать значения темнового тока, т. к. они были сняты при отличных от ВАХ фототока значений напряжения смещения. В итоге, были построены ВАХ, где по оси ординат находится разность значений фототока и интерполированного темнового тока, т. е. чистый сигнал, а по оси абсцисс напряжение смещения. В итоге, все 4 измерения ВАХ помещены на одну диаграмму и нормированы на ток накопителя.

2) Скан пин-фото диода по вертикали — это график зависимости сигнала (В) от положения объекта исследования (мм), считывался АЦП.

3) Расчёт дозы излучения.

Для расчёта дозы излучения, воспользовались следующей формулой:

$$\frac{d^2F}{d\theta d\psi}(\psi = 0) = 1,327 * 10^{13} E^2 [\text{ГэВ}] I[A] H_2(y)$$

где $E = 4,5$ ГэВ энергия электронов (табличное значение), I – ток накопителя (значение зависит от момента времени), $H_2(y)$ вычисляется как:

$$H_2(y) = y^2 K_2^2\left(\frac{y}{2}\right)$$

где $y = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$ текущая энергия на критическую энергию, значения которых также известны (9 кэВ выставлено на монохроматоре и 5,86 кэВ из табличных данных).

После чего полученное значение умножалось на кривые пропускания: Ве (материал вакуумных окошек, не пропускающих воздух в ускоритель) и воздуха, а также на кривую поглощения Si (табличные данные). После чего считалась энергия:

$$E_{\text{излуч}} = \int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{текущ}}} FI(t) dt$$

где F – посчитанная функция, I – снятые значения фототока.

$$D = \frac{E_{\text{излуч}}}{m}$$

где D – доза полученного излучения в грях (Гр), масса $m(\text{Si}) = 25,8$ кг.

5. Результаты и их обсуждение.

По графику видно (рис. 11), что ВАХ не деградировала, следовательно характеристики пин-фотодиода остались прежними, вывести данный полупроводник из строя не удалось. Доза, полученная пин-фотодиодом на монохроматическом излучении в течении первых 30 минут, равна: $3.85\text{e-}15$ Гр для тока накопителя 7,312 мА; и доза полученная ещё через 30 минут: $1.115\text{e-}14$ Гр для тока накопителя 6,415 мА.

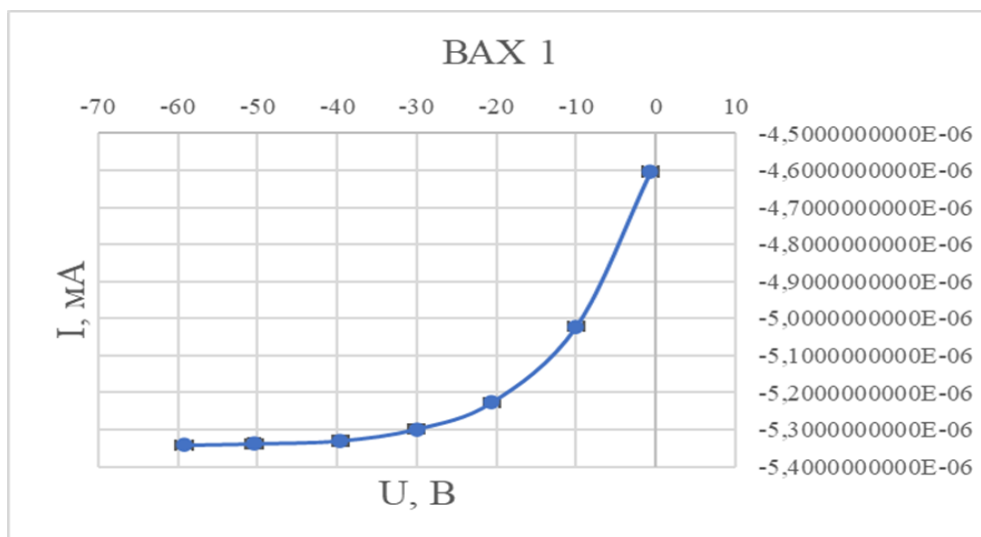


Рис. 7. ВАХ пин-фотодиода первое измерение

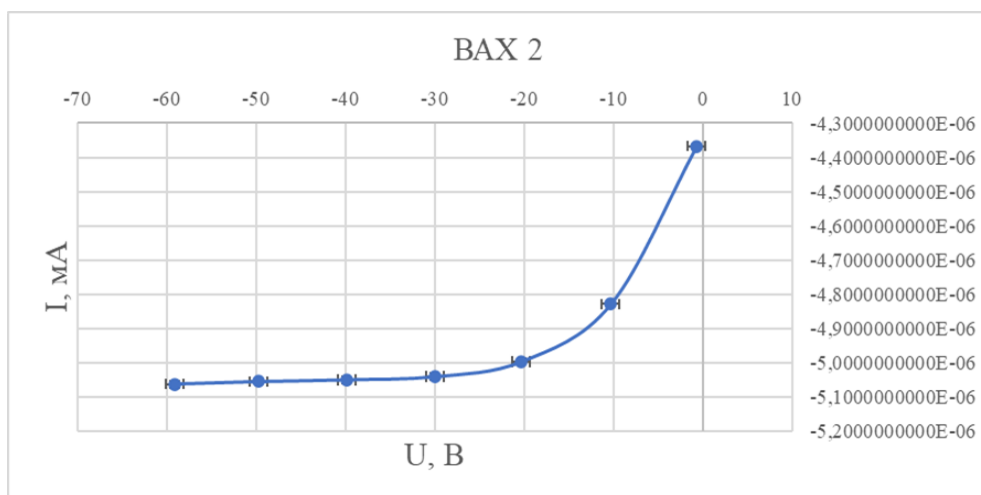


Рис. 8. ВАХ пин-фотодиода 2-ое измерение спустя 30 минут

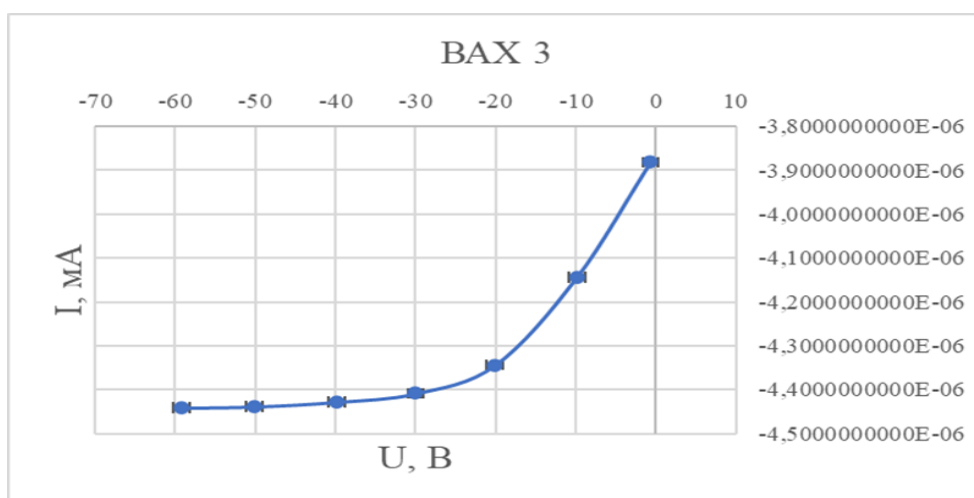


Рис. 9. ВАХ пин-фотодиода 3-е измерение спустя 1 час

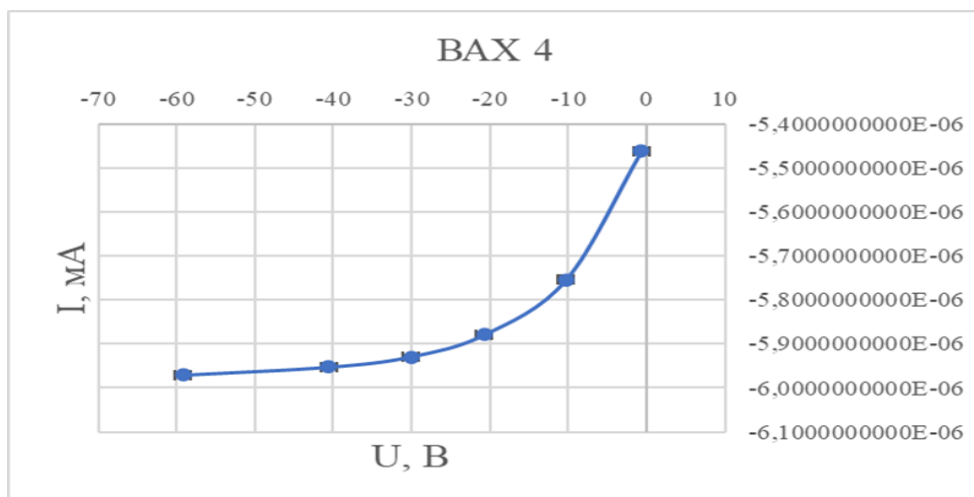


Рис. 10. BAX пин-фотодиода 4-е измерение спустя 1,5 часа

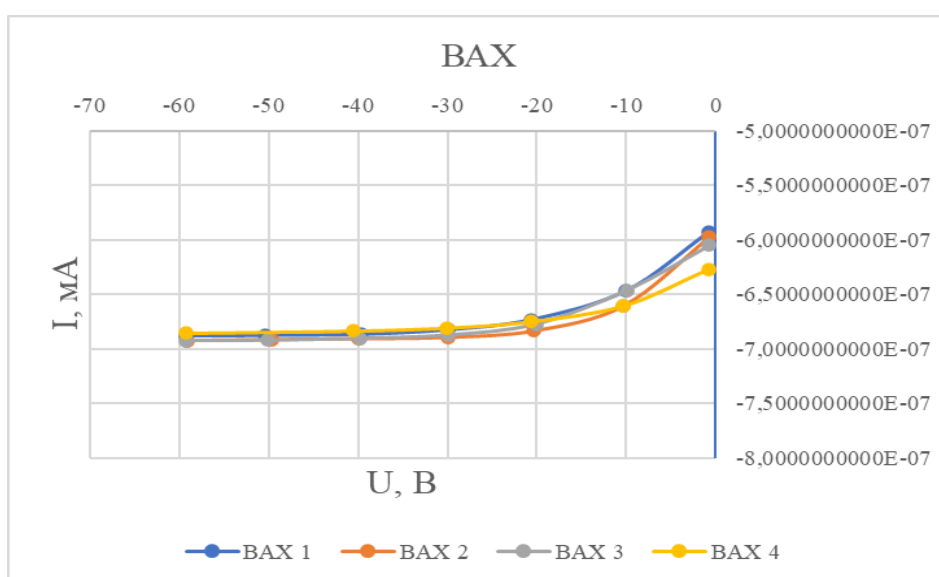


Рис. 11. 1,2,3,4 – нормированные BAX пин-фотодиода

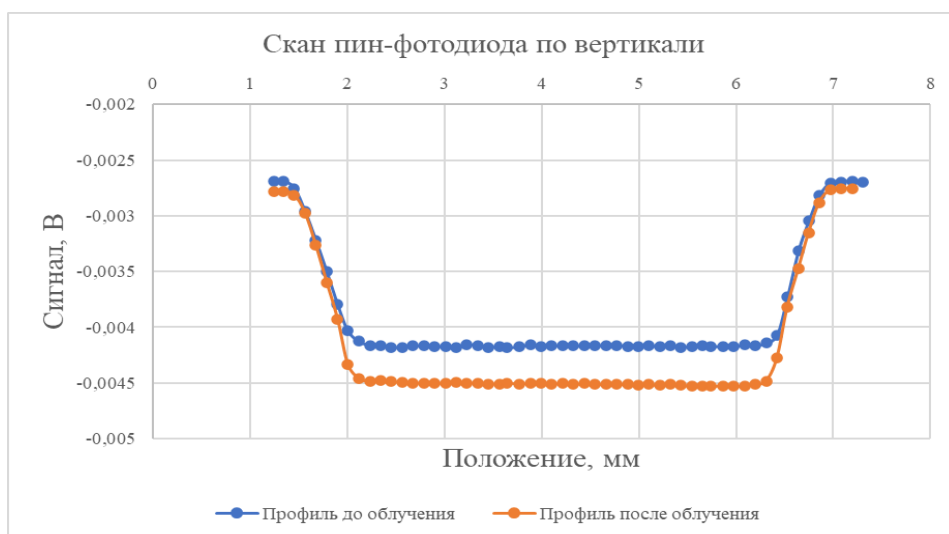


Рис. 12. Скан пин-фотодиода по вертикали

График скана пин-фотодиода по вертикали (рис. 12) подтверждает вышесказанное утверждение: деградации не произошло, пин-фотодиод однороден, даже после облучения БП в течение 30 минут. Таким образом, изменения ВАХ в пределах погрешности (см. как изменилось положение нуля для ВАХ БП на рис. 11) предположительно связано с мощным облучением БП, попадающего, а следовательно, влияющего на всю электронику внутри камеры, но точно не связано с деградацией пин-фотодиода.

6. Выводы.

В рамках работы была изучена деградация пин-фотодиода при воздействии на него монохроматического и белого пучка СИ, показано, что несмотря на внешние признаки воздействия пучка, характеристики пучка практически не изменились. Значит данный пин-диод пригоден для выполнения измерений в монохроматических пучках СИ и, по крайней мере, для кратковременного использования в белых пучках СИ.

7. Список литературы:

1. Ч. Киттель Введение в физику твёрдого тела.
2. Фетисов Г. В. Фундаментальная и прикладная физика Синхротронное излучение: методы исследования структуры веществ.
3. http://biik.ru/uchebnik/cvosp_vosp/page11.html
4. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. С.56.
5. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969.
6. Thompson and Vaughan – 2001 - X-ray Data Booklet.
7. ПРОЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЭПП-4М 2019 г. Б. Г. Гольденберг, Я. В. Ракшун, С. В. Бугаев, О. И. Мешков, С. В. Цыбуля.