

Поляризация полупроводниковых сенсоров ионизирующего излучения на основе алмазных материалов

А.С. Сигов¹, А.А. Алтухов^{1,2}, К.Н. Зяблюк²

¹«МИРЭА - Российский технологический университет», г. Москва

²«Производственно-Технологический Центр «УралАлмазИнвест», г. Москва, uai-co@yandex.ru

Аннотация — Исследуется процесс поляризации сенсоров ионизирующих излучений на основе монокристаллического CVD алмаза при воздействии больших доз α -излучения с энергией 5.5 МэВ в диапазоне напряжений смещения от 0.4 до 1 В/мкм. При положительном напряжении смещения (дырочный дрейф) доза облучения, приводящая к 50% снижению эффективности сбора заряда в области α -пика меняется в диапазоне от 1.7×10^4 $\alpha/\text{мм}^2$ при смещении 0.4 В/мкм до 1.2×10^6 $\alpha/\text{мм}^2$ при 1 В/мкм. При отрицательном напряжении смещения (электронный дрейф) поляризация сенсора не наблюдается. Для сравнения приводятся результаты исследований работы сенсора ионизирующих излучений на основе поликристаллического CVD алмаза в аналогичных условиях.

Ключевые слова — сенсор, ионизирующее излучение, алмаз, поляризация, эффективность сбора заряда.

I. ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства монокристаллического алмаза, которые по совокупности электрофизических параметров превосходят другие полупроводниковые материалы, привлекают специалистов при разработке и изготовлении целого ряда перспективных изделий полупроводниковой микро- и опто-электроники на его основе [1] - [3], включая СВЧ-транзисторы [4], [5], фотоприемные многоэлементные устройства УФ-диапазона [6], [7], изделия МЭМС [8], нетрадиционные устройства [9], сенсоры ионизирующих излучений [10], [11].

Благодаря высокому напряжению пробоя и большой ширине запрещенной зоны алмазные сенсоры обладают низким уровнем шума по сравнению с кремниевыми. Высокая подвижность носителей заряда и большая скорость насыщения при больших напряжениях смещения позволяют изготавливать сенсоры с высоким быстродействием. Большая энергия смещения атома кристаллической решетки алмаза придает ему высокую радиационную стойкость. Данные свойства позволяют использовать алмазные сенсоры в условиях интенсивных радиационных полей, при повышенных температурах и в условиях агрессивных сред. В частности, алмазные сенсоры используются на ускорителях частиц для контроля отклонения пучка [12], [13]. Исследуются возможности применения

алмазных сенсоров для контроля быстрых и медленных нейтронов на экспериментальных реакторах термоядерного синтеза [14].

Для эффективной работы сенсора ионизирующих излучений алмаз должен иметь низкое содержание примесей и дефектов, препятствующих движению носителей заряда, образующихся при попадании заряженных частиц в кристалл. В настоящее время для изготовления сенсоров практически целиком используются синтетические алмазы, получаемый методом газозольного осаждения (CVD) [15]. Монокристаллические алмазные пластины, пригодные для изготовления сенсоров, предлагаются на коммерческой основе [16]. Согласно заявлению производителя и независимым измерениям [11], [17] при толщине 0.5 мм они имеют эффективность сбора заряда не менее 95% и разрешение по энергии на уровне 0.3–0.4 %. Поликристаллические алмазные пластины имеют меньшую стоимость и доступны в больших размерах. Однако эффективность сбора заряда в поликристаллических алмазных детекторах как правило не превышает 30%, что ограничивает область их применения. Другим недостатком поликристаллических сенсоров является их способность к поляризации [18], [19] и накоплению объемного заряда в кристалле алмаза, приводящее к уменьшению эффективности сбора заряда и амплитуды выходного сигнала детектора.

В недавних работах [20] - [22] явление поляризации наблюдалось и для монокристаллических алмазных сенсоров в результате длительного воздействия α -излучения от радиоактивных источников ^{241}Am или ^{238}Pu . В обоих случаях α -частицы с энергией около 5.5 МэВ поглощаются в приповерхностном слое толщиной 13.5 мкм, далее происходит дрейф электронов или дырок через объем алмазного кристалла, в зависимости от полярности приложенного напряжения смещения. В указанных работах наблюдалась поляризация CVD-сенсоров в режиме дырочного дрейфа, в режиме электронного дрейфа характеристики работы сенсоров не менялись. При этом видно существенное расхождение в скорости поляризации сенсоров в работах [21] и [22] в режиме дырочного дрейфа. Если в [21] наблюдалось 2-кратное падение скорости счета в пике при дозах около 10^4 $\alpha/\text{мм}^2$, то в [22] дозы существенно выше (эффективность сбора заряда в

зависимости от дозы не указана, но полная доза на протяжении измерений составила около $5 \times 10^5 \alpha/\text{мм}^2$.

Скорость поляризации является важной характеристикой сенсора, которую необходимо учитывать при разработке приборов регистрации на основе алмазных материалов для работы в условиях высокой интенсивности облучения. Зная закономерность образования поляризационного заряда, можно рассчитать оптимальные промежутки времени, через которые необходимо проводить процедуру деполяризации сенсора путем выключения напряжения смещения или перемены полярности. С этой целью в представленной работе производится исследование процесса поляризации алмазного CVD сенсора в процессе длительного облучения α -источником ^{238}Pu с интенсивностью около $100 \alpha/(\text{с} \text{ мм}^2)$ вплоть до доз $7 \times 10^6 \alpha/\text{мм}^2$ при различных напряжениях смещения. Для сравнения приводятся результаты измерения скорости поляризации поликристаллического CVD сенсора.

II. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерений использовалась монокристаллическая CVD-алмазная пластина производства компании «Element Six» [16] размером $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$ толщиной 0.5 мм (detector grade, - по спецификации изготовителя). Согласно этой спецификации, содержание азота и бора в кристалле составляет менее 5 ppb и 1 ppb, соответственно. С обеих сторон пластины были нанесены алюминиевые (Al) контакты толщиной около 100 нм через маску размером $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$ методом магнетронного распыления в среде аргона при давлении 10 мТорр. Для измерения α -спектра к обеим контактам были подведены проводники, идущие к усилителю и многоканальному анализатору SBS-77 производства компании «Грин Стар» со встроенным источником напряжения смещения с разрешением по времени 2 мкс. Над кристаллом была закреплена диафрагма с окном $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$, препятствующая попаданию α -частиц на его края. Кристалл располагался в экранирующем алюминиевом корпусе.

Для измерения процесса длительного воздействия α -частиц в режиме дырочного дрейфа на верхний контакт подавалось напряжение смещения +500 В. Сверху диафрагмы помещался α -радиоактивный источник ^{238}Pu , зазор между источником и верхним контактом кристалла не превышал 0.5 мм. Спектр сигналов от α -частиц накапливался и регистрировался каждые 10 мин, измерения проводились в течение 20 часов.

Далее производилась деполяризация кристалла. С этой целью выключалось напряжение смещения, кристалл оставался под излучением источника в течение 30 мин. Затем на кристалл подавалось напряжение смещения -500 В и производилась регистрация спектров каждые 10 мин в течение 20 часов в режиме электронного дрейфа.

Аналогичным образом записывались спектры при напряжениях смещения +400, -400, +300, -300, +200, -200 В. После каждого измерения производилась деполяризация, как описано выше. На рис. 1 показаны α -спектры для монокристаллического CVD.

Для сравнения были получены α -спектры с сенсора, изготовленного на пластине из поликристаллического CVD алмаза электронного качества производства компании «Element Six». Согласно спецификации производителя, в таких пластинах эффективность сбора заряда составляет обычно $>36\%$ и длина пробега заряда обычно $>180 \text{ мкм}$ при напряжении смещения 1 В/мкм. Размер поликристаллической пластины $5 \times 5 \text{ мм}^2$ при толщине 0.5 мм, размер нанесенных контактов $4 \times 4 \text{ мм}^2$. Альфа-спектры поликристаллического CVD-алмаза приведены далее, на рис. 3.

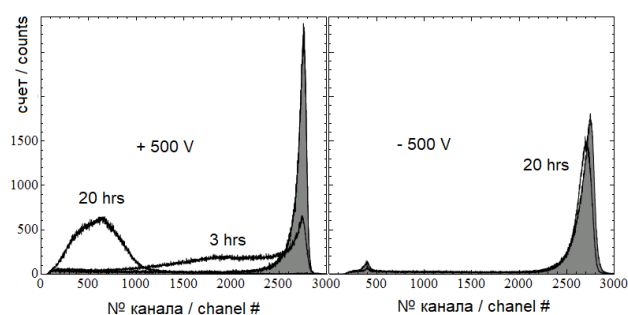


Рис. 1. α -спектры монокристаллического CVD-сенсора в режиме дырочного дрейфа (смещение +500В) и в режиме электронного дрейфа (-500В).

III. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектры монокристаллического CVD сенсора, записанные при напряжении смещения $\pm 500 \text{ В}$, показаны на рис. 1. Время записи спектров 10 мин, заштрихованные спектры записаны в начале процесса облучения. Изотоп ^{238}Pu излучает α -частицы с энергией 5.499 МэВ (71%) и 5.456 МэВ (29%). В начале измерений спектры представляют собой пики шириной 2.5% на половине высоты при +500 В и 5% при -500 В. Как показано в [11], [22] ширина α -пика (или разрешение по энергии) монокристаллических алмазов может достигать 0.3–0.4 %. В данном случае ширина пика ограничена не столько свойствами алмаза, сколько шумами усилителя и спектрометрической аппаратуры. Скорость счета сенсора составляла $600 \alpha/\text{с}$; таким образом плотность потока α -частиц на поверхность сенсора составила $100 \alpha/(\text{с} \text{ мм}^2)$. Таким образом, за 20 часов измерений при каждом напряжении смещения алмаз получал дозу порядка $4 \times 10^7 \alpha$, или $7 \times 10^6 \alpha/\text{мм}^2$.

Как видно на рис. 1 (справа), в процессе электронного дрейфа (при отрицательном напряжении смещения) в первые полчаса α -пик незначительно сместился влево и уменьшился в высоте, после чего не менялся на протяжении всех 20 часов. В тоже время в режиме дырочного дрейфа (при положительном напряжении смещения) α -пик со временем начинает «проседать», при этом появляется плато в области промежуточных каналов, как показано на рис. 1 слева.

Еще через некоторое время пик исчезает совсем, а спектр приобретает колоколообразную форму с центром в области малых каналов. Центр колокола, по мере набора дозы, смещается влево, а его высота растет; за 20 часов измерений при +500 В стационарное состояние достигнуто не было.

При более низких напряжениях смещения наблюдается аналогичное поведение сенсора: в режиме электронного дрейфа форма спектра практически не меняется, а в режиме дырочного дрейфа наблюдается поляризация. При этом, при уменьшении напряжения смещения скорость поляризации существенно возрастает. Для определения скорости поляризации при каждом положительном напряжении была рассчитана скорость счета сенсора в области пика. В качестве области пика был выбран диапазон от 2300 до 3000 канала, что соответствует диапазону энергий 4.6–6 МэВ. Зависимость скорости счета в пике от дозы α -излучения показана на рис. 2. Светлые кружки показывают зависимость, снятую с источником ^{238}Pu с интенсивностью 13 $\alpha/(\text{с мм}^2)$. Для наглядности скорость счета нормирована на значение в начале измерений, так как абсолютные значения в каждом случае отличались в пределах 10% из-за неоднородности источника. Видно, что скорость поляризации нелинейно зависит от напряжения смещения источника.

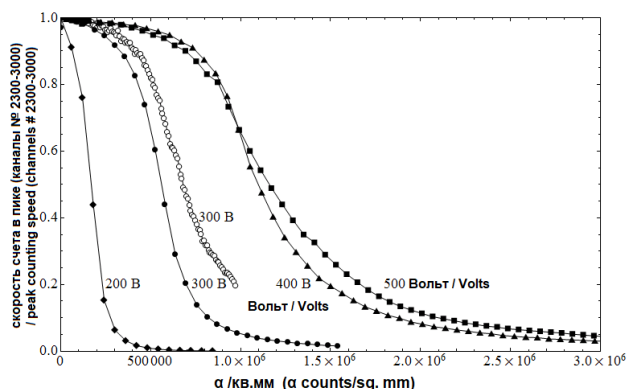


Рис. 2. Зависимость относительной скорости счета в пике от дозы α -облучения при положительных напряжениях смещения.

Процесс поляризации кристалла происходит в результате попадания носителей на ловушки, сосредоточенные в дефектах или примесях кристалла. Образуется объемный заряд, который блокирует электрическое поле и ухудшает эффективность работы сенсора. При этом ловушки являются долгоживущими. В частности, удаление источника на 10 мин от поляризованного кристалла при напряжении +500 В не привело к заметному изменению формы спектра. Это подтверждается и тем фактом, что процесс поляризации слабо зависит от интенсивности источника. В частности, при напряжении смещения +300 В были дополнительно произведены измерения процесса поляризации с использованием более слабого источника ^{238}Pu , обеспечивающего скорость счета 85 $\alpha/(\text{с мм}^2)$, или 13 $\alpha/(\text{с мм}^2)$. Как видно из кривой,

изображенной на рис. 2 светлыми кружками, скорость счета в пике после облучения в течение 20 часов падает до 20% от первоначального значения. При использовании сильного источника такое же падение достигается за 2 часа. При этом зависимость от дозы облучения в обоих случаях отличается незначительно. Это свидетельствует в пользу того, что за все время измерения разряжается относительно небольшая доля заряженных ловушек в кристалле.

Существуют 2 механизма, ухудшающие эффективность сбора заряда в полупроводниковом сенсоре: (1) поглощение носителей заряда дефектами кристалла (2) рекомбинация электронов и дырок друг с другом в области их образования. В случае монокристаллического CVD-алмаза первый механизм оказывается несущественным, так как при получаемых дозах облучения величина заряда, проходящая через кристалл, значительно превышает заряд, необходимый для полного блокирования электрического поля в сенсоре. Действительно, при напряжении смещения $U = +500 \text{ В}$, толщине кристалла $d = 0.5 \text{ мм}$, диэлектрической константе алмаза $\epsilon = 5.7$ поверхностная плотность заряда, необходимая для обнуления электрического поля в кристалле равна

$$Q = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot U/d = 3 \cdot 10^8 \text{ е /мм}^2$$

где d – толщина подложки, U – напряжение смещения; ϵ – диэлектрическая константа (алмаза); ϵ_0 – электрическая постоянная.

Учитывая, что на образование одной электронно-дырочной пары в алмазе в среднем уходит 13 эВ, то при облучении α -частицами с энергией 5.5 МэВ такой заряд образуется при дозе около 700 $\alpha/(\text{с мм}^2)$. Это на несколько порядков меньше доз, при которых начинается поляризация, см. рис. 2. Таким образом, вероятность поглощения заряда ловушками в монокристаллическом CVD-алмазе очень мала; однако при длительной работе сенсора на них накапливается заряд, который уменьшает электрическое поле в приповерхностном слое, где поглощаются α -частицы. В определенный момент поле становится недостаточным, чтобы «растачить» электроны и дырки из области их формирования, и они начинают рекомбинировать друг с другом. Эффективность работы сенсора падает.

В случае поликристаллического CVD алмаза поляризация наступает значительно быстрее. Результаты измерений зависят от их предыстории и часто не повторяются. Кроме того, спектры могут отличаться для обеих граней кристалла. Поликристаллическая пластина состоит из множества малых монокристаллов (зерен) с различной ориентацией. В процессе CVD роста зерна увеличиваются в размерах, поэтому верхняя грань поликристаллических пластин обычно работает лучше, чем нижняя. На рис. 3 представлены спектры поликристаллического алмаза, полученные от источника ^{238}Pu с интенсивностью 13 $\alpha/(\text{с мм}^2)$. Заштрихованная область показывает спектр вначале измерений, точки — через 30 мин измерений. Интенсивность облучения 13 $\alpha/(\text{с мм}^2)$. Энергетическая

шкала откалибрована по монокристаллическому CVD-алмазу

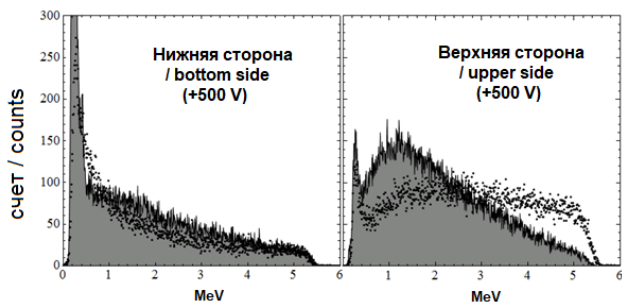


Рис. 3. Спектры с обеих граней поликристаллического алмазного CVD сенсора.

Вначале были записаны спектры для источника, расположенного над гранью, обозначенной на рис. 3 как «низ». Затем кристалл был перевернут и записаны спектры для грани, обозначенной как «верх». Для каждой грани спектры регистрировались в течении 30 мин, время записи каждого спектра 5 мин. Если для верхней грани скорость счета во всем энергетическом диапазоне сохранялась на уровне 200 с^{-1} , то для нижней грани за 30 мин измерений скорость счета упала от 170 до 120 с^{-1} . Это означает, что часть α -частиц дают сигнал с амплитудой меньше нижнего порога дискриминации усилителя и не регистрируются.

Попытки снять α -спектр с поликристаллического CVD-алмаза от источника с интенсивностью $100 \alpha/(\text{с мм}^2)$ привели к тому, что после размещения источника над кристаллом, он сразу же поляризовался и скорость счета мгновенно падала до $\sim 20 \text{ с}^{-1}$ (вместо ожидаемой 1600 с^{-1} для площади контактов $4 \times 4 \text{ мм}^2$). На восстановление работоспособности сенсора под действием слабого источника уходило около 1 часа. Это свидетельствует о значительно большей концентрации ловушек заряда по сравнению с монокристаллами CVD и ограничивает область применения поликристаллов.

IV. ВЫВОДЫ

Проведено исследование работы сенсоров ионизирующих излучений, изготовленных на основе подложек высококачественного монокристаллического CVD-алмаза под действием больших доз α -излучения с энергией 5.5 МэВ в диапазоне напряжений смещения 0.4 - 1 В/мкм. Сенсоры демонстрируют стабильную работу в режиме электронного дрейфа вплоть до доз $7 \times 10^6 \alpha/\text{мм}^2$. В режиме дырочного дрейфа идет процесс поляризации, что свидетельствует о наличие дырочных ловушек в монокристалле CVD с большим временем жизни в заряженном состоянии, что наблюдалось в работах [20]-[22]. Кристалл деполяризуется при облучении α -источником при выключенном напряжении смещения, но остается поляризованным длительное время без облучения источником.

Дозы α -излучения, характеризующие скорость поляризации монокристаллического CVD-сенсора, приведены в табл. 1. Они сильно зависят от напряжения смещения, но слабо от интенсивности источника.

Измеренная доза излучения при смещении +400В на 2 порядка превосходит аналогичный результат работы [21], что, по-видимому, объясняется различным качеством исследуемых алмазных кристаллов.

Таблица 1

Доза α -излучения, приводящая к 50% уменьшению скорости счета монокристаллического алмазного CVD-сенсора в области α -пика (4.6–6 МэВ)

| Интенсивность, $\alpha/(\text{с мм}^2)$ | 100 | | | | 13 |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Смещение, В | +200 | +300 | +400 | +500 | +300 |
| Доза, $\alpha/\text{мм}^2$ | 1.7×10^4 | 5.6×10^5 | 1.1×10^6 | 1.2×10^6 | 6.8×10^5 |

Измеренные дозы облучения могут быть использованы для расчета промежутков времени, через которые необходимо проводить деполяризацию алмазных сенсоров в условиях высокой интенсивности облучения.

В тоже время современные образцы поликристаллического CVD-алмаза, по всей видимости, мало пригодны для изготовления сенсоров ионизирующих излучений при интенсивности свыше $\sim 10 \alpha/(\text{с мм}^2)$ из-за высокой скорости поляризации.

Следует отметить, что полученные результаты надо с осторожностью распространять на алмазные сенсоры, предназначенные для регистрации других видов заряженных частиц и гамма-квантов из-за их большей проникающей способности. Для изучения процесса поляризации алмазных сенсоров под действием других видов излучений необходимы дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yang N. (ed.). Novel Aspects of Diamond. From Growth to Applications. Edition 2. Springer Nature Switzerland AG, 2019, P.517.
- [2] Khmelnitsky R. A., Talipov N. H., Chucheva G. V. Synthetic diamond for electronics and optics. Moscow: IKAR Publishing House, 2017. - 228 p.
- [3] Altukhov A.A., Afanasiev M.S., Kvaskov V.B. [et al]. Application of diamond in high technology. Inorganic materials. 2004. Vol.40. Suppl.1. P.50- 70.
- [4] Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках. Москва: Техносфера, 2011. 256с. ISBN 978-5-94836-290-8
- [5] Алтухов А.А., Бугаев А.С., Гуляев Ю.В., Зяблюк К.Н., А.Ю.Митягин, Г.В.Чучева. Перспективы создания СВЧ-элементов на основе полупроводниковых алмазных материалов // Успехи современной радиоэлектроники. ISSN 2070-0784. 2011. N 6. С.3-18.
- [6] Altukhov A.A., Klochkova A.M., Mityagin A.Yu., Orlova G.A. Diamond-based photosensitive matrix elements for the UV range // Journal of Communications Technology and Electronics. 2008. T. 53. N. 8. P. 941-945.
- [7] Feshchenko V.S. Altukhov A.A., Mityagin A.Yu. [et al.] A 128x128 Pixel Ultraviolet Photodetector Based on a Diamond Sensor // Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. V. 55, N. 6. P.716 – 719.

- [8] Auciello O., Pacheco S., Sumant A.V. [et al.] Are diamonds a MEMS' best friend? // IEEE Microwave Magazine. 2007. P. 61-75.
- [9] Карасев В.Ю., Мозгин А.А. Новый взгляд на применение кристаллов алмаза в микроэлектронике и нанотехнологиях // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем - 2006. Сборник научных трудов под общ. ред. А.Л.Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2006. С. 295-299.
- [10] K.V. Zakharchenko, A.A. Altukhov, R.F. Ibragimov, V.A. Kolyubin, S.A. Lvov, E.M.Tyurin. Diamond detectors of space radiation: the ways to counter the polarization effect. The Eleventh Moscow solar system symposium 11M-S3 October 5-9, 2020. Space Research Institute Of Russian Academy Of Sciences. Moscow, Russia 11M-S3-Abstract_book_full_version_04.pdf. 2020.- P.87-88.
- [11] Berdermann E., Pomorski M., de Boer W., Ciobanu M., Dunst S., Grah C., Kis M., Koenig W., Lange W., Lohmann W., Lovrincic R., Moritz P., Morse J., Mueller S., Pucci A., Schreck M., Rahman MD. S., Trager M. Diamond detectors for hadron physics research. Diamond and Related Materials. 2010. V. 19. P. 358-367.
- [12] Edwards A.J., Brau B., Bruinsma M., Burchat P., Kagan H., Kass R., Kirkby D., Petersen B.A., Zoeller M. Radiation Monitoring With Diamond Sensors in BABAR. IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (IEEE Cat. No.03CH37515). 2003. Vol. 1. PP. 83-86. doi: 10.1109/NSSMIC.2003.1352003.
- [13] Cindro V., Dobos D., Dolenc I., Frajs-Kolbl H., Gorišek A., Griesmayer E., Kagan H., Kramberger G., Maček B., Mandić I., Mikuž M., Niegl M., Pernegger H., Tardif D., Trischuk W., Weilhammer P., Zavrtanik M. The ATLAS Beam Conditions Monitor. J. Inst. 2008. V. 3. P. 02004.
- [14] Angelone M., Lattanzi D., Pillon M., Marinelli M., Milani E., Tucciarone A., Verona-Rinati G., Popovichev S., Montemali R.M., Vincenti M.A., Murari A. Development of single crystal diamond neutron detectors and test at JET tokamak. Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A. 2008. V. 595. P. 616.
- [15] Balmer R.S., Brandon J.R., Clewes S.L., Dhillon H.K., Dodson J.M., Friel I., Inglis P.N., Madgwick T.D., Markham M.L., Mollart T.P., Perkins N., Scarsbrook G.A., Twitchen D.J., Whitehead A.J., Wilman J.J., Woollard S.M. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications. J. Phys.: Condens. Matter. 2009. V. 21. P. 364221.
- [16] Сайт компании Element Six, De Beers Group Company. <https://e6cvd.com> (дата обращения: 30.08.2021).
- [17] Shimaoka T., Kaneko J.H., Tsubota M., Shimmyo H., Watanabe H., Chayahara A., Umezawa H., Shikata S.-i. High-performance diamond radiation detectors produced by lift-off method. Europhysics Letters. 2016. V. 113(6). P. 62001.
- [18] Bergonzo P., Tromson D., Descamps C., Hamrita H., Mer C., Tranchant N., Nesladek M.. Improving diamond detectors: A device case. Diamond and Related Materials. 2007. V. 16. N. 4. P. 1038-1043.
- [19] Marinelli M., Milani E., Paoletti A., Tucciarone A., Rinati G.V., Angelone M., Pillon M. Systematic study of the normal and pumped state of high efficiency diamond particle detectors grown by chemical vapor deposition. J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 1430-1435.
- [20] Ибрагимов Р.Ф., Кадилин В.В., Тюрин Е.М., Колубин В.А. Исследование явления поляризации в алмазных детекторах ионизирующих излучений // Вестник «МИФИ». 2014. Т. 3. № 4. С.416.
- [21] Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C., Croci G., Tardocchi M., Perelli Cippo E., Frost C.D., Zaccagnino D., Varoli V., Gorini G. Time-stability of a Single-crystal Diamond Detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation. Diamond and Related Materials. 2016 V. 61. P. 1-6. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.11.002
- [22] Sato Y., Murakami H., Shimaoka T., Tsubota M., Kaneko J.H. Charge-collection efficiency and long-term stability of single-crystal CVD diamond detector under different carrier-drift conditions. Japanese J. Appl. Phys. 2016. V. 55. P. 046401-1-5.

Phenomena of Polarization of Ionizing Radiation Sensors Based on Diamond Materials

A. S. Sigov¹, A. A. Altukhov^{1,2}, K. N. Zyablyuk²

¹MIREA-Russian Technological University, Moscow

²Production and Technological Center “UralAlmazInvest”, Moscow, uai-co@yandex.ru

Abstract — The process of polarization of ionizing radiation sensors based on single-crystal CVD diamond substrates under the influence of large doses of alpha - radiation with an energy of 5.5 MeV in the range of bias voltages from 0.4 to 1 V/mkm is studied. At a positive bias voltage (hole drift), the radiation dose leading to a 50% decrease in the charge collection efficiency in the alpha-peak region varies in the range from 1.7×10^4 /mm² at a displacement of 0.4 V/m to 1.2×10^6 /mm² at 1 V/m. At a negative bias voltage (electron drift), the sensor polarization is not observed. The alpha-radiation doses characterizing the polarization rate of a single-crystal CVD's diamond substrates sensor are shown.

They strongly depend on the bias voltage, but weakly on the intensity of the source. The measured radiation dose at a displacement of +400V is 2 orders of magnitude higher than the similar results, which, apparently, is explained by the different quality of the studied diamond crystals. For comparison, the results of studies of the operation of an ionizing radiation sensor based on polycrystalline CVD diamond substrates under similar conditions are presented.

Keywords — diamond sensor, ionizing radiation, polarization, charge collection efficiency.

REFERENCES

- [1] Yang N. (ed.). *Novel Aspects of Diamond. From Growth to Applications*. Edition 2. Springer Nature Switzerland AG, 2019, p.517.
- [2] Khmel'nitsky R. A., Talipov N. H., Chucheva G. V. *Synthetic diamond for electronics and optics*. Moscow: IKAR Publishing House, 2017. - 228 p.
- [3] Altukhov A.A., Afanasiev M.S., Kvaskov V.B. [et al]. *Application of diamond in high technology, Inorganic materials*. 2004.- vol.40, suppl.1, pp.50- 70.
- [4] Vasiliev A. G, Kolkovskiy Yu. V., Kontsevov Yu. A. *Microwave transistors on wide-band semiconductors*. Moscow: Technosphere. 2011. P.256. ISBN 978-5-94836-290-8
- [5] Altukhov A. A., Bugaev A. S., Gulyaev Yu. V., Zyablyuk K. N., A. Yu. Mityagin, G. V. Chucheva. *Prospects for the creation of microwave elements based on semiconductor diamond materials. Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*. ISSN 2070-0784. 2011. N 6. P. 3-18.
- [6] Altukhov A.A., Klochkova A.M., Mityagin A.Yu., Orlova G.A. *Diamond-based photosensitive matrix elements for the UV range // Journal of Communications Technology and Electronics*. 2008. -T. 53. -No. 8. -P. 941-945.
- [7] Feshchenko V.S. Altukhov A.A., Mityagin A.Yu. [et al.] *A 128x128 Pixel Ultraviolet Photodetector Based on a Diamond Sensor // Journal of Communications Technology and Electronics*. 2010. V. 55. No.6. P.716 – 719.
- [8] Auciello O., Pacheco S., Sumant A.V., Gudeman C., Sampath S., Datta A., Carpick R.W., Adiga V. P., Zurcher P., Ma Z., Yuan Hao-Chih, Carlisle J.A., Kabijs B., Hiller J., and Srinivasan S. *Are diamonds a MEMS' best friend? IEEE Microwave Magazine*. 2007. P. 61-75.
- [9] Karasev V.Yu., Mozgin A.A. *New issues in application of diamond crystals in microelectronics and nanotechnologies // Problems of Perspective Microelectronic Systems Development - 2006. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2006. P. 295-299.*
- [10] Zakharchenko K.V., Altukhov A.A., Ibragimov R.F., Kolyubin V.A., Lvov S.A., Tyurin E.M.. *Diamond detectors of space radiation: the ways to counter the polarization effect. The Eleventh Moscow solar system symposium 11M-S3 October 5-9, 2020. Space Research Institute Of Russian Academy Of Sciences. Moscow, Russia 11M-S3-Abstract_book_full_version_04.pdf*. 2020.- P.87-88.
- [11] Berdermann E., Pomorski M., de Boer W., Ciobanu M., Dunst S., Grah C., Kis M., Koenig W., Lange W., Lohmann W., Lovrincic R., Moritz P., Morse J., Mueller S., Pucci A., Schreck M., Rahman M.D. S., Trager M. *Diamond detectors for hadron physics research. Diamond and Related Materials*. 2010. V. 19. P. 358-367.
- [12] Edwards A.J., Brau B., Bruinsma M., Burchat P., Kagan H., Kass R., Kirkby D., Petersen B.A., Zoeller M.. *Radiation Monitoring With Diamond Sensors in BABAR. IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record (IEEE Cat. No.03CH37515)*. 2003. Vol. 1. PP. 83-86. doi: 10.1109/NSSMIC.2003.1352003.
- [13] Cindro V., Dobos D., Dolenc I., Frais-Kolbl H., Gorišek A., Griesmayer E., Kagan H., Kramberger G., Maček B., Mandić I., Mikuž M., Niegl M., Pernegger H., Tardif D., Trischuk W., Weilhammer P., Zavrtnik M. *The ATLAS Beam Conditions Monitor. J. Inst.* 2008. V. 3. P. 02004.
- [14] Angelone M., Lattanzi D., Pillon M., Marinelli M., Milani E., Tucciarone A., Verona-Rinati G., Popovichev S., Montekali R.M., Vincenti M.A. *Development of single crystal diamond neutron detectors and test at JET tokamak. Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A*. 2008. V. 595. P. 616.
- [15] Balmer R.S., Brandon J.R., Clewes S.L., Dhillon H.K., Dodson J.M., Friel I., Inglis P.N., Madgwick T.D., Markham M.L., Mollart T.P., Perkins N., Scarsbrook G.A., Twitchen D.J., Whitehead A.J., Wilman J.J., Woollard S.M. *Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications. J. Phys.: Condens. Matter*. 2009. V. 21. P. 364221.
- [16] Element Six, De Beers Group Company. <https://e6cvd.com> (access date: 30.08.2021)
- [17] Shimaoka T., Kaneko J.H., Tsubota M., Shimmyo H., Watanabe H., Chayahara A., Umezawa H., Shikata S.-i. *High-performance diamond radiation detectors produced by lift-off method. Europhysics Letters*. 2016. V. 113(6). P. 62001.
- [18] Bergonzo P., Tromson D., Descamps C., Hamrita H., Mer C., Tranchant N., Nesladek M.. *Improving diamond detectors: A device case. Diamond and Related Materials*. 2007. V. 16. N. 4. P. 1038-1043.
- [19] Marinelli M., Milani E., Paoletti A., Tucciarone A., Rinati G.V., Angelone M., Pillon M. *Systematic study of the normal and pumped state of high efficiency diamond particle detectors grown by chemical vapor deposition. J. Appl. Phys*. 2001. V. 89. P. 1430–1435.
- [20] Ibragimov R. F., Kadilin V. V., Tyurin E. M., Kolyubin V. A. *Investigation of the polarization phenomenon in diamond detectors of ionizing radiation. Vestnik "MEPhI"*. 2014. Vol. 3. No. 4. P. 416.
- [21] Rebai M., Fazzi A., Cazzaniga C., Croci G., Tardocchi M., Perelli Cippo E., Frost C.D., Zaccagnino D., Varoli V., Gorini G. *Time-stability of a Single-crystal Diamond Detector for fast neutron beam diagnostic under alpha and neutron irradiation. Diamond and Related Materials*. 2016 V. 61. P. 1-6. DOI: 10.1016/j.diamond.2015.11.002
- [22] Sato Y., Murakami H., Shimaoka T., Tsubota M., Kaneko J.H. *Charge-collection efficiency and long-term stability of single-crystal CVD diamond detector under different carrier-drift conditions. Japanese J. Appl. Phys*. 2016. V. 55. P. 046401-1–5