

## Релаксационные эффекты в полевых датчиках Холла при воздействии импульса ионизирующего облучения

*Громов Д. В., Мордкович В. Н., Пажин Д. М., Скоробогатов П. К.*

*Статья посвящена теоретическому моделированию и экспериментальному исследованию релаксационных эффектов в канале КНИ полевых датчиков Холла, вызываемых воздействием импульсного ионизирующего облучения. Показано, что воздействие импульса ионизирующего излучения приводит к изменению проводимости канала и проявляется в форме временного увеличения тока и изменения ЭДС на холловских контактах элемента. Приводятся данные о времени восстановления тока канала и ЭДС Холла исследуемых элементов, вызываемых воздействием импульса ионизирующего излучения различной мощности.*

### **Введение**

Известно, что одним из существенных факторов воздействия ионизирующих излучений на полупроводник является генерация неравновесных носителей тока, связанная с потерями радиационной энергии при её взаимодействии с электронами облучаемого объекта. При импульсном облучении процесс восстановления исходного значения концентрации носителей (время релаксации) определяет период, в течение которого характеристики полупроводниковых приборов отличаются от равновесных значений [1].

В первичных преобразователях магнитного поля, основанных на эффекте Холла (далее датчики Холла, ДХ), радиационно-индуцируемая генерация носителей тока вызывает изменения тока, протекающего через ДХ, тем большие, чем выше интенсивность облучения. В свою очередь, это приводит к изменению величины измеряемой ЭДС Холла, поскольку при постоянном значении индукции магнитного поля холловский сигнал пропорционален величине тока, протекающего по каналу ДХ [2]. Таким образом, пока не произойдёт релаксация концентрации носителей, показания ДХ могут ошибочно трактоваться как изменения магнитного поля, воздействующего на прибор.

В работах [3,4] был описан новый тип ДХ (так называемый полевой датчик Холла – ПДХ), изготовленный на основе структуры «кремний на изоляторе». Поперечное сечение и вид сверху на ПДХ представлены на рис. 1. В таком приборе тонкая (0,2 мкм) кремниевая область (канал), в которой формируются холловский резистор, токовый и измерительные контакты, отделена от кремниевой подложки слоем скрытого в ней диэлектрика  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,4 мкм. Очевидно, что систему подложка-слой скрытого диэлектрика можно рассматривать как полевую систему для управления током канала ПДХ. Подобная система получила название нижнего затвора ПДХ.

Внешняя поверхность ПДХ покрыта плёнкой  $\text{SiO}_2$ , на которой расположен металлический затвор, названный верхним затвором. Таким образом, ПДХ является гибридом традиционного ДХ и тонкоплёночного полевого транзистора со встроенным каналом и двухзатворной управляющей системой типа МДПДМ. В работах [5,6] было показано, что двухзатворная конструкция позволяет организовать такие режимы работы ПДХ, при которых существенно увеличивается устойчивость ПДХ к стационарным ионизирующим воздействиям.

Данная работа посвящена анализу поведения ПДХ при импульсных ионизирующих воздействиях. При этом основное внимание уделяется релаксационным эффектам в ПДХ, непосредственно влияющим на величину сигнала на холловских электродах элемента

(ЭДС Холла).

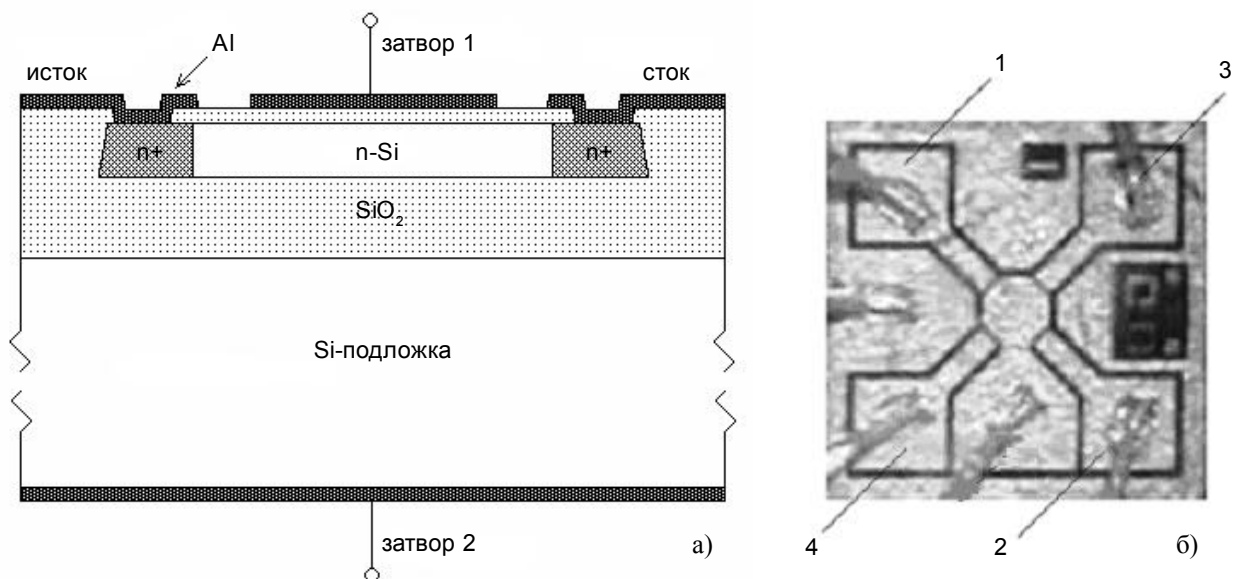


Рис. 1

Поперечное сечение (а) и внешний вид (б) полевого датчика Холла: 1, 2 – контакты питания; 3, 4 – выходы для измерения ЭДС Холла

### **Моделирование релаксационных процессов в канале ПДХ**

Благодаря транзисторной природе ПДХ ток канала такого прибора зависит не только от напряжения питания, но и от величины и знака потенциалов обоих затворов. При измерениях магнитного поля с помощью ПДХ обычно используется схема, при которой оба затвора соединены между собой и плюсом источника питания. В этом случае канал ПДХ полностью открыт, и величина тока в любом сечении канала практически одинакова в каждой точке от истока до стока.

Моделирование релаксационных эффектов, вызванных ионизирующим воздействием в ПДХ, было выполнено с использованием программы физико-топологического моделирования DIODE-2D [7]. Программа осуществляет анализ процессов переноса носителей заряда в рамках диффузионно-дрейфовой модели, описываемой трёхмерной фундаментальной системой уравнений, включающей в себя уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона. В модели принимается, что мощность поглощённой дозы ионизирующего излучения определяет скорости генерации радиационно-индуцируемых электронов и дырок. При этом в случае воздействия ионизирующего облучения электроны и дырки рождаются парами, поэтому скорости их генерации принимаются равными. Скорость рекомбинации электронов и дырок рассчитывается с учётом механизма Шокли-Рида-Холла и Оже-рекомбинации.

Вообще говоря, ионизирующее воздействие создаёт неравновесные носители заряда не только в кремниевом канале ПДХ, но и в обоих подзатворных диэлектриках. Соответственно в них могут измениться встроенный заряд, а также плотность и зарядовое состояние дефектов на границах раздела обоих диэлектриков с кремниевым каналом [1]. Очевидно, что при большой интенсивности ионизирующего облучения изменения электрического состояния подзатворных диэлектриков и границ раздела могут повлиять на концентрацию носителей в кремнии вблизи интерфейсов и соответственно на распределение носителей в канале, на ток канала и изменить разность потенциалов на холловских электродах ПДХ при сохранении неизменным внешнего магнитного поля. Кроме того, существенно более медленные процессы релаксации неравновесного

заряда в диэлектриках [1] могут сказаться на значениях ЭДС Холла в том случае, когда релаксация концентрации носителей в канале уже закончится. В случае ПДХ с учётом ширины запрещённой зоны Si и SiO<sub>2</sub> и значений толщины кремниевого канала и обоих подзатворных диэлектриков легко показать, что ионизирующее излучение в кремниевом канале ПДХ генерирует носители заряда на порядок величины больше по сравнению с диэлектрическими областями. В данном случае моделируется ситуация, когда возможным влиянием эффектов в диэлектриках и на границах разделов можно пренебречь на фоне состояния канала, заданного потенциалом затворов.

Геометрия ПДХ, в котором моделировались релаксационные процессы, соответствовала реальным образцам, используемым для экспериментальной проверки результатов расчёта (длина канала 80 мкм, ширина – 30 мкм, длина областей истока и стока 4 мкм). При расчётах концентрация доноров в канале ПДХ составляла  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , концентрация радиационно-индуцированных электронов и дырок определялась мощностью дозы облучения. При этом моделируется случай, при котором импульсное ионизирующее облучение создаёт неравновесные носители заряда равномерно во всём объёме кремниевого канала ПДХ. Время жизни носителей тока в канале принималось равным 1 и 0,3 мкс для электронов и дырок соответственно. Время жизни носителей в областях стока и истока принималось равным 10 нс для электронов и 3 нс для дырок.

Анализ характеристик проводился для случая работы ПДХ от источника постоянного напряжения (5В). Воздействующий импульс ионизирующего излучения имел колоколообразную форму с длительностью на полувысоте равной 22 нс.

Расчёт начального состояния характеристик ПДХ показал, что распределение потенциала вдоль канала элемента практически линейно (поле постоянно). Распределение основных носителей заряда (электронов) соответствует уровню легирования вдоль структуры. Практически вся проводимость ПДХ определяется основными носителями – электронами.

Действие импульса ионизирующего излучения приводит к изменению проводимости канала ПДХ, что проявляется в форме временного увеличения тока, протекающего по каналу элемента, и, как следствие, к изменению величины ЭДС на холловских контактах.

На рисунке 2 приведены характерные расчётные временные зависимости тока через канал ПДХ при различных значениях максимальной мощности поглощённой дозы ионизирующего излучения.

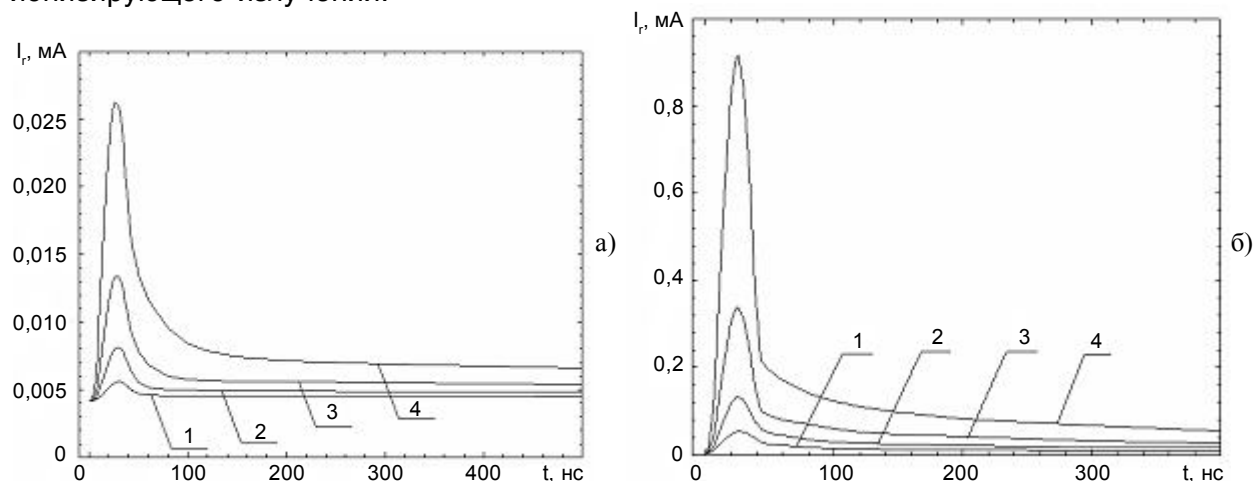


Рис. 2

Временные зависимости тока через канал ПДХ при различных значениях максимальной мощности поглощённой дозы ионизирующего излучения: а)  $3 \cdot 10^8$  -1,  $10^9$  -2,  $3 \cdot 10^9$  -3 и  $10^{10}$  -4 рад(Si)/с; б)  $3 \cdot 10^{10}$  -1,  $10^{11}$  -2,  $3 \cdot 10^{11}$  -3 и  $10^{12}$  -4 рад(Si)/с

Видно, что форма импульса тока в области малых времён релаксации практически повторяет форму импульса ионизирующего излучения и в дальнейшем характеризуется медленным спадом длительностью до нескольких десятков мкс, зависящим от мощности дозы ионизирующего излучения. Это может быть объяснено тем, что основная часть радиационно-индуцированных носителей заряда исчезает в течение небольшого промежутка времени после воздействия импульса ионизирующего излучения за счёт рекомбинации носителей заряда между собой. Незначительная часть радиационно-индуцированных носителей заряда, прежде всего электронов, имеет возможность избежать рекомбинации. Концентрация соответствующих неравновесных носителей заряда с течением времени убывает медленно за счёт их рекомбинации на дефектных центрах.

Результаты численного моделирования поведения тока канала ПДХ дают всю необходимую информацию для расчёта величины ЭДС на электродах Холла ПДХ. В соответствии с [2] холловское напряжение  $V_H$  равно

$$V_H = K_H \cdot B,$$

где  $K_H = R_H \cdot J_x \cdot W$  – магниточувствительность ПДХ;  $R_H$  – коэффициент Холла;  $J_x$  – плотность тока канала;  $W$  – ширина структуры;  $B$  – напряжённость магнитного поля.

В нашем случае коэффициент Холла существенно различен в зависимости от соотношения концентрации электронов  $n$  и дырок  $p$ , зависящего как от мощности дозы облучения, так и от времени, прошедшего после начала воздействия импульса (рис. 3).

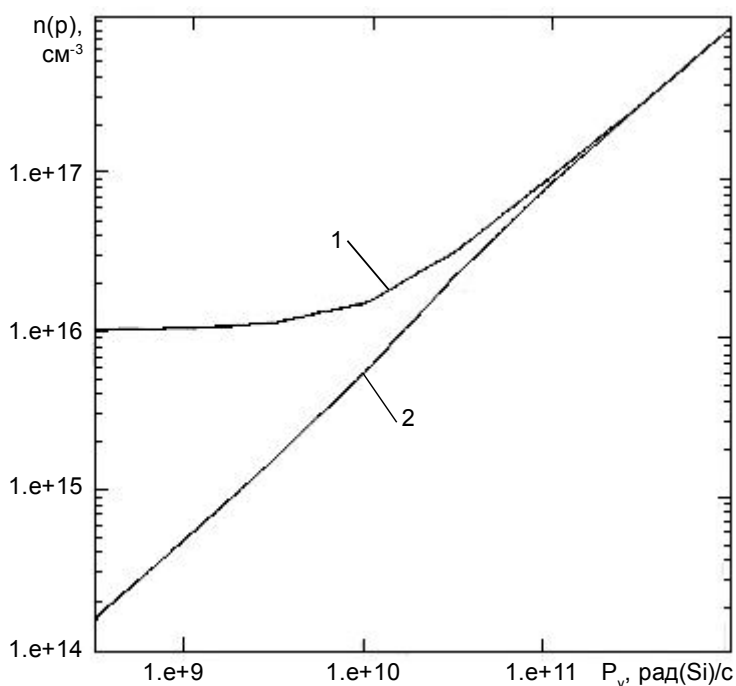


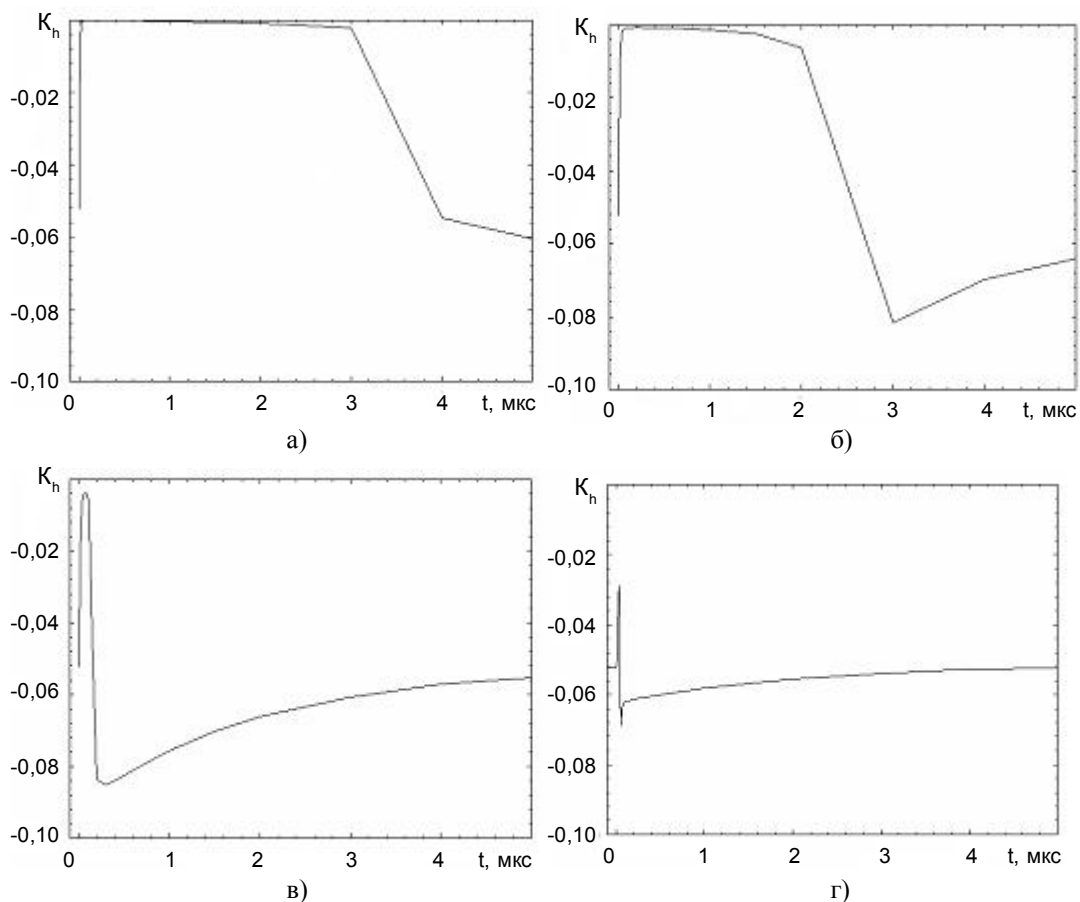
Рис. 3

Зависимость концентрации электронов (1) и дырок (2) в канале ПДХ от мощности поглощённой дозы импульса ионизирующего излучения

Результаты численного моделирования ЭДС Холла ПДХ при воздействии импульса ионизирующего излучения с различными значениями максимальной мощности дозы представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что отклик холловской чувствительности имеет немонотонный характер. Во время и сразу после воздействия импульса проводимость канала имеет биполярный характер, концентрации электронов и дырок велики и близки между собой,

холловская чувствительность практически падает до нуля, так как  $n \approx p$  и  $\mu_n \approx \mu_p$ . По мере снижения концентрации неравновесных носителей проводимость ПДХ становится монополярной (электронной) и холловская чувствительность не только восстанавливается, но в течение некоторого времени превышает её стационарное значение. Это связано с тем фактом, что в течение достаточно большого промежутка времени ток через канал ПДХ, вызванный основными носителями заряда электронами, превышает своё равновесное значение, и дальнейшая релаксационная кривая магниточувствительности будет повторять релаксационное поведение тока канала элемента.



**Рис. 4**

Расчётные временные зависимости холловской чувствительности ПДХ при воздействии импульса ионизирующего излучения с максимальной мощностью:  $10^{12}$  (а),  $10^{11}$  (б),  $10^{10}$  (в),  $10^9$  (г) рад(Si)/с

Известно [2], что при  $n \gg p$  коэффициент Холла записывается как

$$R_H = r/q_n n \quad (\text{А}),$$

где  $r$  – коэффициент рассеяния, определяемый доминирующим механизмом рассеяния (при рассеянии на ионизированных примесях равен 1,93);  $q$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация электронов.

В случае  $n \approx p$  (биполярная проводимость)

$$R_H = r/q(p - b^2 n)/(p + bn)^2 \quad (\text{Б}),$$

где  $r$  – коэффициент рассеяния, определяемый доминирующим механизмом рассеяния (при рассеянии на ионизированных примесях равен 1,93);  $q$  – заряд электрона;  $p, n$  – концентрации электронов и дырок соответственно;  $b = \mu_n/\mu_p$  – отношение подвижностей электронов и дырок.

Таким образом, непосредственно в момент воздействия импульса ионизирующего облучения коэффициент Холла описывается как (Б), а спустя некоторое время после его прекращения – как (А).

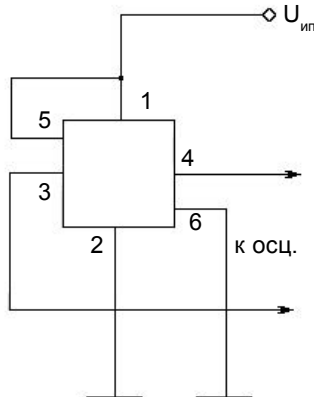
Из рис. 4 видно, что время восстановления холловской чувствительности в пределах 5% от стационарного значения с ростом мощности облучения от  $10^9$  до  $10^{12}$  рад(Si)/с изменяется в пределах от долей мкс до единиц мкс в зависимости от мощности импульса ионизирующего облучения. Время, в течение которого ПДХ полностью неработоспособен ( $K_h \approx 0$ ), составляет около 3 мкс (при максимальной для расчёта мощности дозы облучения  $10^{12}$  рад(Si)/с).

### **Экспериментальное измерение характеристик элементов при воздействии импульсного ионизирующего облучения**

Переходная ионизационная реакция на холловских электродах ПДХ измерялась при воздействии на прибор постоянного внешнего магнитного поля напряжённостью 50 мТл. При соответствующих измерениях электроды ПДХ были включены по схеме, представленной на рис. 5. Из рисунка видно, что электрод верхнего затвора ПДХ (электрод 5) был подключён к «+» источника питания (относительно общей точки схемы). Электрод нижнего затвора (электрод 6) находился на общей точке. Сигнал с холловских контактов (электроды 3 и 4) направлялся на цифровой быстродействующий запоминающий осциллограф. Между токовыми контактами ПДХ с помощью источника постоянного напряжения подавалось напряжение питания равное 5 В, что обеспечивало протекание в исходном состоянии (до воздействия ионизирующего импульса) рабочего тока  $I_{ип}$  величиной 30 мкА. Подобный режим включения ПДХ в литературе принято называть режимом работы от источника напряжений.

В качестве источника ионизирующего излучения использовался лазерный имитатор «РАДОН-5М» с длиной волны светового излучения 1,06 мкм.

Плётка подзатворного диэлектрика  $SiO_2$  прозрачна для света с такой длиной волны, поэтому лазерный импульс не вызывает прямой ионизации диэлектрических слоёв ПДХ и изменения величины фиксированного заряда в плёнках  $SiO_2$  [8]. Таким образом, использование импульсного лазерного ионизирующего излучения позволило реализовать ситуацию, приводящую к изменению проводимости канала ПДХ только за счёт генерации неравновесных носителей в его канале.



**Рис. 5**

Схема включения электродов КНИ ПДХ в режиме работы от источника напряжений при измерении переходной ионизационной реакции на холловских электродах

На рис. 6 представлено изменение напряжения на холловских электродах ПДХ, вызванное воздействием импульса ионизирующего облучения мощностью  $1,3 \cdot 10^{10}$  рад(Si)/с. Из рисунка видно, что время релаксации ЭДС Холла составляет немногим более 4 мкс, что удовлетворительно согласуется с результатами проведённого численного моделирования.

На практике элементы Холла обычно используются для измерения либо постоянных, либо низкочастотных магнитных полей с максимальной частотой порядка 100-200 кГц. Таким образом, очевидно, что воздействие импульсной ионизирующей радиации с мощностью менее  $1,3 \cdot 10^{10}$  рад(Si)/с не вызовет сложностей в использовании ПДХ в типичных случаях измерений постоянных магнитных полей и не скажется на измерениях переменных магнитных полей. С ростом мощности дозы ионизирующего излучения

предельная рабочая частота ПДХ несколько уменьшится.

Известно, что характеристики ПДХ чувствительны к выбору электрического режима включения его электродов в процессе облучения [5,6].

С целью поиска наиболее оптимального режима включения ПДХ при импульсном ионизирующем воздействии была экспериментально исследована ионизационная реакция холловской чувствительности ПДХ, включённого в режим работы от источника тока. Как и в случае работы от источника напряжений, на электрод верхнего затвора элемента с помощью источника постоянного напряжения подавалось напряжение смещения положительной полярности относительно находящегося на общей точке одного из токовых контактов ПДХ и электрода нижнего затвора. Между токовыми контактами элемента подавалось напряжение от источника постоянного тока, который обеспечивал постоянство тока канала ПДХ  $I_{\text{ин}}$  равного 30 мкА.

На рис. 7 представлена переходная ионизационная реакция ЭДС Холла ПДХ, вызванная импульсом лазерного излучения с уровнем  $1,3 \cdot 10^{10}$  рад(Si)/с. Видно, что время восстановления ЭДС Холла составляет примерно 1,5 мкс, что существенно меньше такой величины для ПДХ, включённого в режим работы от источника напряжений. Очевидно, что в случае ПДХ, включённого в режим работы от источника тока, время релаксации в основном определяется временем срабатывания источника постоянного тока. Естественно предположить, что оптимизация конструкции источника тока способна обеспечить дальнейшее уменьшение времени релаксации холловского напряжения. Можно также заметить, что в течение 4 мкс после начала воздействия импульса значение ЭДС Холла не возвращается к своему значению до облучения. По всей видимости, это связано с возможным изменением заряда и плотности поверхностных состояний на границе раздела кремниевого канала с диэлектриками.

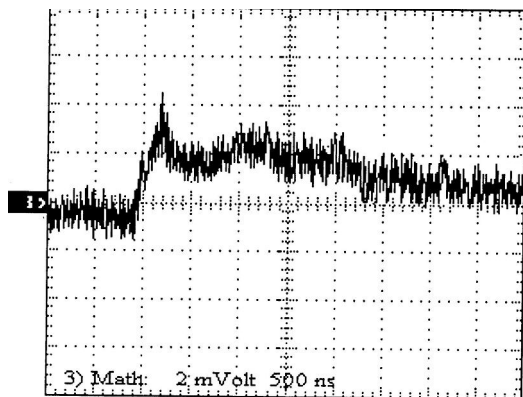


Рис. 6

Переходная ионизационная реакция ПДХ, включённого в режим работы от источника напряжений при воздействии ионизирующего облучения с уровнем  $1,3 \cdot 10^{10}$  рад(Si)/с

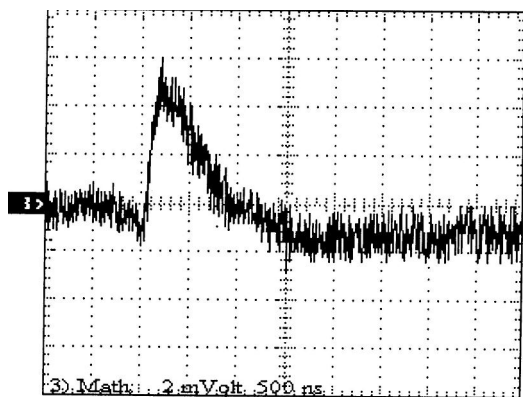


Рис. 7

Переходная ионизационная реакция ПДХ, включенного в режим работы от источника тока при воздействии ионизирующего облучения с уровнем  $1,3 \cdot 10^{10}$  рад(Si)/с

---

## *Заключение*

Работа посвящена изучению релаксационных эффектов в канале полевых датчиков Холла, вызванных воздействием импульсного ионизирующего облучения. Показано, что процесс релаксации тока канала ПДХ после воздействия импульса ионизирующего излучения в области малых времен релаксации практически повторяет форму импульса ионизирующего облучения и имеет длинный спад, обусловленный рекомбинацией неравновесных носителей заряда. Продемонстрировано, что время релаксации ЭДС Холла, вызванной генерацией неравновесных радиационно-индуцированных носителей в канале элемента, длится от долей до единиц мкс в зависимости от мощности дозы ионизирующего воздействия и схемы включения элемента в процессе радиационного воздействия. Показано, что влияние импульсного ионизирующего облучения на характеристики ПДХ может быть минимизировано выбором электрического режима его включения в процессе облучения.

## *Литература*

1. Агаханян Т. М., Аствацатурьян Е. Р., Скоробогатов П. К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах/Под ред. Т. М. Агаханяна. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 256 с.
2. R. S. Popovich Hall Effect Devices, IOP Publishing Ltd, 2004.
3. В. Н. Мордкович, М. Л. Бараночников, А. В. Леонов, А. Д. Мокрушин, Н. М. Омеляновская, Д. М. Пажин. Полевой датчик Холла – новый тип преобразователя магнитного поля. – Датчики и системы, № 7, 2003, с. 33-37.
4. В. Н. Мордкович, М. Л. Бараночников, А. В. Леонов, А. Д. Мокрушин, Н. М. Омеляновская, Д. М. Пажин. Новый магниточувствительный элемент – полевой датчик Холла. – Инженер, технолог, рабочий, № 4, 2004, с. 22-24.
5. В. Н. Мордкович, А. Д. Мокрушин, Н. М. Омеляновская и др. Радиационные эффекты в КНИ магниточувствительных элементах при различных условиях облучения. – ВАНТ, вып. 1-2, 2001, с. 77-81.
6. A. D. Mokrushin, N. M. Omeljanovskaja, A. V. Leonov, V. N. Mordkovich, D. M. Pazhin. Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different radiation conditions. // Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions, 2002, 221-227.
7. Программа DIODE-2D. Руководство пользователя. – М.: ЭНПО СПЭЛС, 1996.
8. Habing D. H. Use of Laser to Simulate Radiation-Induced Transients in Semiconductor and Circuits//IEEE Trans, 1965, Vol. NS-15, N5, P. 91-100.