

# Особенности подвижности электронов в тонком слое кремния в структуре диэлектрик—кремний—диэлектрик

© А.В. Леонов<sup>¶</sup>, А.Д. Мокрушин, Н.М. Омеляновская

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ) Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

(Получена 3 октября 2011 г. Принята к печати 10 октября 2011 г.)

Представлены результаты исследований подвижности электронов в тонком слое кремния системы металл—диэлектрик—полупроводник—диэлектрик—металл в зависимости от величины продольного и поперечного электрических полей (в широком диапазоне их значений), температуры (в диапазоне от 1.7 до 400 К) и изменения условий  $\gamma$ -облучения.

Показано, что в интервале температур от 400 до  $\sim 100$  К подвижность электронов увеличивается в соответствии с механизмом рассеяния на акустических фононах, тогда как при дальнейшем снижении температуры вплоть до температур жидкого гелия подвижность падает вследствие того, что превалирующим становится кулоновское рассеяние электронов на заряженных поверхностных центрах.

Показано также, что в результате  $\gamma$ -облучения подвижность электронов уменьшается, причем степень этого уменьшения сильно зависит от электрического режима датчика в процессе облучения.

## 1. Введение

Практически реализуемые значения подвижности носителей заряда в планарной кремниевой технологии микроэлектроники имеют первостепенное значение для расчета рабочих параметров как отдельных элементов (транзистор), так и больших интегральных схем в целом. В КНИ-структурах в силу исключительно малой толщины рабочего слоя кремния, составляющей сотни и даже десятки нм, наблюдается существенное уменьшение подвижности (в сравнении с объемным кремнием), связанное с дополнительным рассеянием носителей на поверхностных заряженных центрах на границе Si/SiO<sub>2</sub>, а также с рассеянием на неоднородностях поверхности (шероховатость) и поверхностных фононах [1,2]. Последний вид рассеяния становится превалирующим при толщине рабочего слоя кремния в несколько нм [2]. Кроме того, в кремниевых МОП-структурах значительную роль играет уменьшение подвижности носителей в сильных электрических полях. Так, для электронов подвижность начинает уменьшаться при напряженностях поля более 3 кВ/см [3]. Поскольку в МОП-транзисторах толщины окисных слоев обычно не превышают 10<sup>-5</sup> см, то при затворных смещениях всего в несколько Вольт поперечное электрическое поле на границе SiO<sub>2</sub>/Si становится сильным и определяет величину приповерхностной подвижности носителей [4–6].

Не менее важен вопрос и о влиянии температуры на подвижность носителей в кремнии. В широком диапазоне температур (от гелиевых до комнатных) эта зависимость имеет экстремальный характер с пониженными значениями как в области низких, так и высоких температур, причем значения подвижности существенно зависят от степени легирования кремния [3]. Поведение приповерхностной подвижности носителей в МОП-структурах в зависимости от напряженности элек-

трического поля при различных температурах детально анализировалось в работах [4–6].

В настоящей работе нами изучалось поведение подвижности электронов в тонком слое кремния в структуре М–Д–П–Д–М в широком диапазоне значений продольного и поперечного электрических полей и при различных температурах. В такой структуре рабочий слой кремния располагается между двумя диэлектрическими слоями, что позволяет создать двухзатворный элемент с более широкими возможностями управления его характеристиками. В нашем случае таким элементом является полевой датчик Холла (ПДХ) [7]. Кратко рассматривался вопрос и о влиянии радиационного облучения на подвижность электронов в ПДХ.

## 2. Объекты исследования и методика эксперимента

Конструкция исследованных датчиков подробно описана в работе [7]. Исходным материалом являлась пластина монокристаллического кремния *n*-типа (уровень легирования фосфором  $\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>); путем имплантации ионов кислорода в пластине сформирован скрытый слой окисла SiO<sub>2</sub> толщиной 0.4 мкм, который отсекает рабочий слой кремния толщиной 0.2 мкм. В горизонтальном сечении чувствительный элемент датчика имеет форму квадрата со стороной 0.5 мм. На краях рабочего слоя кремния сформированы симметрично расположенные омические контакты — два токовых и два холловских. Таким образом, кремниевый канал в нашем случае имеет одинаковые значения длины и ширины. На рабочий слой кремния нанесен подзатворный окисел толщиной 25 нм и непосредственно затвор из алюминия (верхний затвор). На основании пластины также нанесен алюминий и для каждого датчика основание имеет отдельный вывод (нижний затвор).

Наиболее важными характеристиками обсуждаемых ПДХ являются ток-затворная (ТЗХ — зависимость ра-

<sup>¶</sup> E-mail: lave@sci.lebedev.ru

**Таблица 1.** Значения максимального холловского напряжения  $U_H^{\max}$ , максимальной подвижности электронов  $\mu^{\max}$ , напряженности продольного  $E_l$  и поперечного  $E_t$  полей и их отношения  $E_t/E_l$

$U_p$ , В	$E_l$ , В/см	Верхний затвор ( $U_g^{Up} = 0$ )				Нижний затвор ( $U_g^l = 0$ )			
		$U_x^{\max}$ , мВ	$\mu^{\max}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$E_t$ , В/см	$E_t/E_l$	$U_x^{\max}$ , мВ	$\mu^{\max}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$E_t$ , В/см	$E_t/E_l$
2	40	420	368	$1.2 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^4$	340	300	$1.2 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^3$
3	60	610	354	$2.0 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^4$	490	286	$1.5 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^3$
4	80	810	354	$2.4 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^4$	615	270	$2.2 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^3$
5	100	980	343	$3.0 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^4$	730	256	$3.0 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^3$

*Примечание.* Коэффициент усиления холловского напряжения  $K_H = 130$ , индукция магнитного поля  $B = 45$  мТл.

бочего тока датчика  $I$  от затворного смещения  $U_g$  при постоянном напряжении питания  $U_p$ ) и холл-затворная (ХЗХ — зависимость холловского напряжения  $U_H$  от  $U_g$ ). Здесь следует отметить, что величина холловского напряжения  $U_H$  является разностью двух напряжений на холловских выводах датчика: при наличии внешнего магнитного поля ( $U_H$ ) и в отсутствие его ( $U_{H_0}$ ), причем величина  $U_{H_0}$  зависит как от  $U_p$ , так и от  $U_g$ . В обычном (классическом) датчике Холла величина  $U_H$  прямо пропорциональна рабочему току, величина которого определяется напряжением питания. В случае полевого датчика Холла рабочий ток и холловское напряжение зависят как от напряжения питания, так и от затворного смещения, а взаимосвязь между  $U_H$  и  $I$  может быть установлена по результатам измерений ток-затворных и холл-затворных характеристик. Поэтому на первом этапе наших исследований были измерены ТЗХ и ХЗХ при различных  $U_p$  и в двух вариантах приложения затворного смещения: к верхнему затвору (при заземленном нижнем) и наоборот. Особое внимание было уделено измерению характеристик ПДХ при низких температурах (вплоть до гелиевых) и при большой индукции внешнего магнитного поля (вплоть до 5 Тл). При этих измерениях верхний и нижний затворы соединялись вместе. Исследовалось также влияние  $\gamma$ -облучения (изотоп  $\text{Co}^{60}$ ) при дозах до 100 крад на характеристики ПДХ при раздельном функционировании каждого затвора в процессе как облучения, так и измерения. Значение холловской подвижности электронов, усредненной по толщине рабочего слоя кремния, рассчитывалось из следующего соотношения [8]:

$$\mu = 10^4 U_H / (U_p B), \tag{1}$$

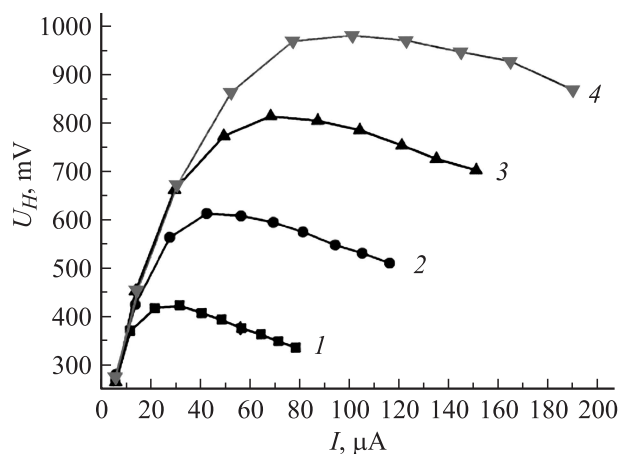
справедливого в случае равных значений длины и ширины кремниевого канала. В выражении (1) напряжения выражены в Вольтах, а индукция магнитного поля  $B$  — в единицах Тесла (Тл). При этом подвижность получается в единицах  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### 3. Результаты и их обсуждение

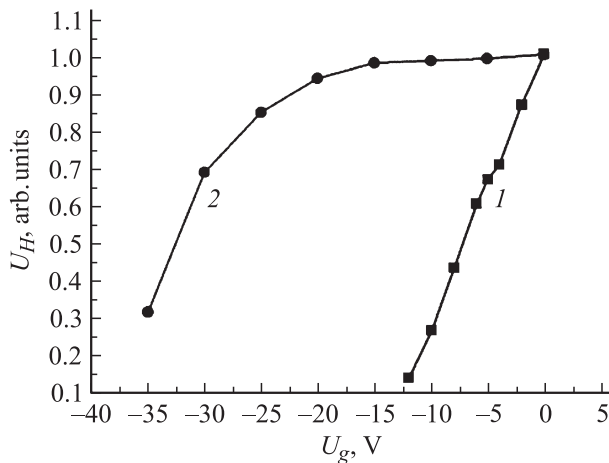
На рис. 1 представлен ряд взаимозависимостей  $U_H-I$ , полученных на основе измеренных ТЗХ и ХЗХ характе-

ристик. Для каждой кривой напряжение питания фиксировано, а интервал между экспериментальными точками соответствует изменению смещения на верхнем затворе на 1.5 В, крайние левые точки соответствуют  $U_g = 0$ . При этом нижний затвор был заземлен. Аналогичные взаимозависимости  $U_H-I$  получены при заземленном верхнем затворе и изменяющемся смещении нижнего затвора. Качественно они соответствуют рис. 1, некоторые количественные различия будут анализироваться далее.

Судя по рис. 1, холловское напряжение увеличивается с ростом тока лишь на начальных участках кривых (при затворных смещениях  $U_g < U_p$ ), затем достигает максимума и далее уменьшается. Наблюдаемое уменьшение  $U_H$  несомненно связано с падением подвижности электронов в сильных поперечных полях, как это обсуждалось во Введении. Этот вывод подтверждается количественным сравнением наших данных с расчетными результатами, приведенными в работе [6]. Так, для кривой 1 на рис. 1 при переходе от максимума  $U_H$  в крайнее правое положение значение подвижности уменьшается в  $\sim 1.5$  раза, а поперечное поле увеличивается в 3 раза.



**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости холловское напряжение–рабочий ток ПДХ при различных напряжениях питания, В: 1 — 2, 2 — 3, 3 — 4, 4 — 5. Напряжение на нижнем затворе равно 0, для каждой кривой напряжение на верхнем затворе изменяется от 0 (левые точки) с интервалом через 1.5 В. Индукция внешнего магнитного поля  $B = 45$  мТл, коэффициент усиления холловского напряжения  $K_H = 130$ .



**Рис. 2.** Подавление холловского напряжения отрицательным смещением верхнего (кривая 1) или нижнего (кривая 2) затворов при фиксированном положительном смещении 3 В противоположного затвора.  $B = 45$  мТл, коэффициент усиления холловского напряжения  $K_H = 130$ .

Эти измерения соответствуют расчетной зависимости поверхностной подвижности электронов в кремнии от напряженности поля в окисле МОП-структуры при комнатной температуре, представленной на рис. 4 в работе [6].

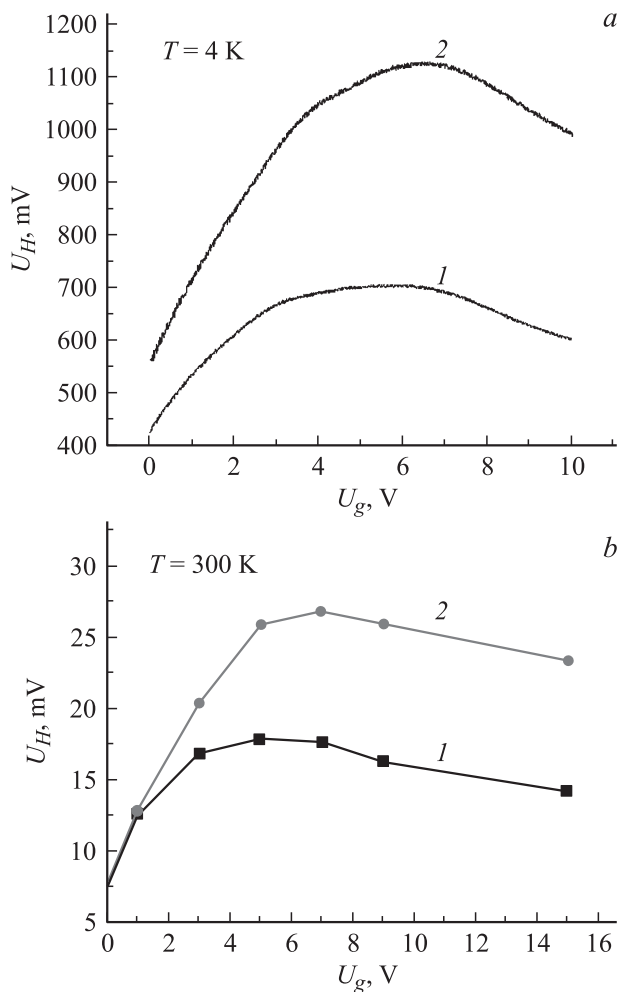
Очевидно, что максимальное холловское напряжение при заданном напряжении питания соответствует максимальной подвижности электронов в рабочем слое кремния. В табл. 1 представлены максимальные значения  $U_H$  и рассчитанные на их основе подвижности электронов при различных напряжениях питания в двух случаях приложения затворного смещения (к верхнему или нижнему затворам).

Здесь же приведены значения напряженности продольного электрического поля ( $E_l$ ) в рабочем слое кремния (определенного напряжением питания) и поперечного поля ( $E_t$ ) в слое окиси кремния (определяемого величиной затворного смещения при  $U_H^{\max}$ , а также их отношения. Из таблицы видно, что величины  $\mu^{\max}$  практически не зависят от напряжения питания и не сильно изменяются при переходе от случая активного верхнего затвора к случаю активного нижнего затвора. Обращает на себя внимание корреляция между постоянством величин  $\mu^{\max}$  и отношений  $E_t/E_l$  при различных напряжениях питания. Для нижнего затвора величины  $E_t$  и  $E_t/E_l$  на порядок величины меньше, чем для верхнего затвора, что обусловлено различием в толщине подзатворных окислов. Кроме того, эти окислы существенно отличаются совершенством интерфейса на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ : полученный в результате имплантации ионов кислорода окисел нижнего затвора имеет более высокую концентрацию поверхностных дефектов. Этот вывод подтверждается результатами проведенных нами измерений вольт-фарадных характеристик для верхнего и нижнего затворов. Таким образом, дополнительное

рассеяние электронов на дефектах интерфейса  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  нижнего затвора может вызвать уменьшение подвижности электронов в случае активации нижнего затвора.

С более совершенной структурой верхнего термического окисла можно связать более эффективную управляемость ПДХ в отношении верхнего затвора. Так, максимальные холловские напряжения достигаются при более низких смещениях для верхнего затвора, чем для нижнего. Об этом же свидетельствует идентичность характеристик ПДХ в двух случаях подачи затворных смещений: а) верхний и нижний затворы соединены вместе; б) нижний затвор заземлен. Для более наглядного представления преобладающей роли верхнего затвора мы провели дополнительные измерения рабочего тока и холловского напряжения в зависимости от величины отрицательного смещения, прикладываемого последовательно к верхнему или нижнему затворам. В каждом из этих случаев на второй затвор подавалось положительное смещение 3 В. На рис. 2 представлены зависимости холловского напряжения от величины смещения верхнего (кривая 1) и нижнего (кривая 2) затворов. Видно, что отрицательное смещение, прикладываемое к верхнему затвору, практически закрывает датчик при  $-10$  В, тогда как в отношении нижнего затвора для этого требуются гораздо большие отрицательные смещения. Этот эффект обусловлен меньшей толщиной окисного слоя под верхним затвором и вследствие этого более сильным поперечным полем в сравнении с нижним затвором при одинаковом затворном смещении.

Ранее неоднократно рассматривался вопрос о влиянии электрического поля на подвижность носителей в МДП-структурах при различных температурах [4–6]. Было показано, что с понижением температуры влияние поля на подвижность становится менее ярко выраженным. При этом диапазон исследованных температур был сравнительно невелик: примерно 150–400 К. Мы расширили этот диапазон снизу вплоть до температуры жидкого гелия. На рис. 3, а, б показаны полученные нами холл-затворные характеристики ПДХ соответственно при комнатной температуре и при 4 К при двух значениях напряжения питания. Анализ этих рисунков приводит к нескольким выводам. Отметим прежде всего, что полевой датчик Холла сохраняет работоспособность при гелиевых температурах в отличие от классического датчика на кремниевой основе. Рис. 3 демонстрирует также качественно одинаковые зависимости холловского напряжения от величины затворного смещения (при этих измерениях выводы верхнего и нижнего затворов соединялись вместе) и при 300 и 4 К: значения  $U_H$  достигают максимума при одинаковом затворном смещении независимо от температуры и затем уменьшаются. Таким образом, сильное электрическое поле подавляет подвижность электронов в тонком слое кремния при различных механизмах рассеяния. Это подтверждает рис. 4, где приведена температурная зависимость поверхностной подвижности электронов, полученная на основе наших данных. При понижении температуры от

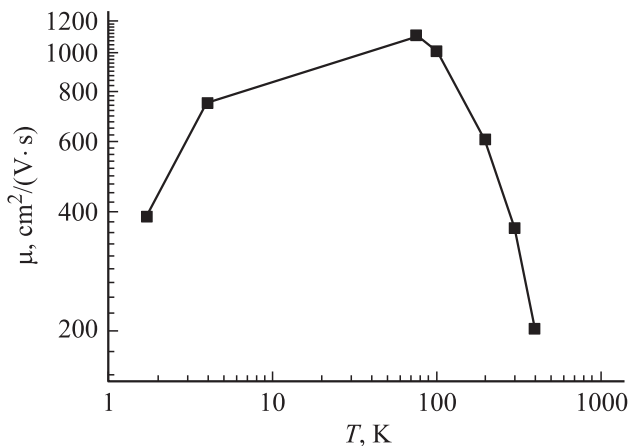


**Рис. 3.** Холл-затворные характеристики ПДХ при 4 (a) и 300 К (b) при напряжениях питания 3 (кривые 1) и 5 В (кривые 2). Магнитное поле 3 Тл (a) и 150 мТл (b).

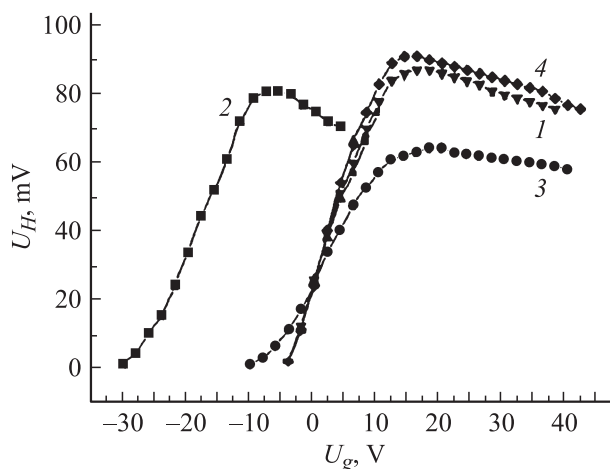
комнатной до  $\sim 80$  К подвижность возрастает примерно втрое в соответствии с механизмом рассеяния электронов на акустических фоновых. С дальнейшим понижением температуры подвижность уменьшается, что связано с изменением механизма рассеяния электронов: преобладающим становится кулоновское рассеяние на поверхностных заряженных центрах.

На величину подвижности электронов в полевых датчиках Холла существенно влияет ионизирующая радиация, в частности  $\gamma$ -облучение. Прежде всего оно вызывает накопление положительного заряда на границе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  вследствие захвата дырок, образующихся в объеме окисла под влиянием радиации. Наличие положительного заряда на границе интерфейса эквивалентно увеличению затворного смещения и приводит к сдвигу ТЗХ и ХЗХ влево по оси затворного напряжения. Величина накопленного заряда в сильной степени зависит от электрического режима работы датчика в процессе облучения. Чтобы продемонстрировать влияние электрического режима ПДХ в процессе облучения, мы

провели измерения ТЗХ и ХЗХ для четырех датчиков в исходном состоянии и после  $\gamma$ -облучения одинаковой дозой (100 крэд) в различных режимах: пассивный режим ( $U_p^{irr} = 0$ ,  $U_g^{irr} = 9$  В), активно-открытое состояние АОС ( $U_p^{irr} = U_g^{irr} = 9$  В), активно-закрытое состояние АЗС ( $U_p^{irr} = 9$  В,  $U_g^{irr} = -9$  В). Результаты показаны на рис. 5. Видно, что облучение в пассивном режиме вызывает радикальное изменение положения ХЗХ, а именно — ее сдвиг влево по оси затворного смещения. Он является результатом накопления положительного заряда в окисле вблизи границы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ : под влиянием положительного затворного смещения радиационно-индуцируемые в окисле дырки движутся к этой границе, где они захватываются структурными дефектами. Наблюдаемое при этом небольшое понижение максимального значения холловского напряжения свидетельствует об уменьшении холловской подвижности электронов вследствие дополнительного рассеяния на положительно заряженных



**Рис. 4.** Температурная зависимость максимальной подвижности электронов в рабочем слое кремния ПДХ.

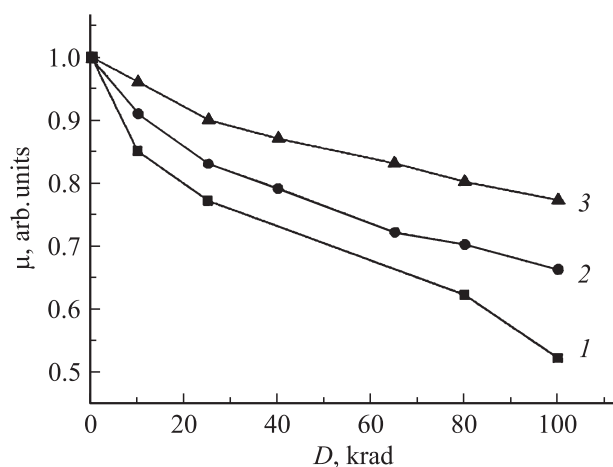


**Рис. 5.** Холл-затворные характеристики ПДХ в исходном состоянии (1) и после  $\gamma$ -облучения в пассивном режиме (2), в активно-открытом (3) и активно-закрытом (4) состояниях.  $U_p = 9$  В,  $B = 0.27$  Тл.

**Таблица 2.** Значение холловской подвижности электронов  $\mu_n$  в рабочем слое кремния ПДХ в исходном состоянии (ИС) и после  $\gamma$ -облучения в пассивном режиме (ПР), в активно-открытом состоянии (АОС) и активно-закрытом состоянии (АЗС)

Состояние	$\mu_n$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
ИВ	355
ПР	330
АОС	270
АЗС	370

центрах. Наиболее существенное уменьшение подвижности наблюдается при облучении датчика в активно-открытом состоянии (кривая 3 на рис. 5), причем в этом случае наблюдается также уменьшение наклона ХЗХ на участке ее подъема. По-видимому, оба эти эффекта обусловлены ростом плотности отрицательно заряженных состояний, на которых и происходит дополнительное рассеяние электронов проводимости. Следует подчеркнуть, что речь идет именно об отрицательно заряженных центрах, суммарный заряд которых компенсирует положительный заряд захваченных дырок. Компенсацией положительно и отрицательно захваченных зарядов можно объяснить отсутствие сдвига влево кривой 3 на рис. 5. Мы полагаем, что процесс зарядки поверхностных состояний осуществляется горячими электронами, т.е. при условии протекания тока через канал. Действительно, облучение датчика в режиме активно-закрытого состояния (ток через канал отсутствует) не вызывает уменьшения подвижности и наклона ХЗХ (кривая 4 на рис. 5). Численные значения холловской подвижности электронов в исходных и облученных датчиках, рассчитанные по выражению (1), приведены в табл. 2.



**Рис. 6.** Дозовые зависимости относительной подвижности электронов в рабочем слое кремния ПДХ, облучавшихся  $\gamma$ -квантами в активно-открытом состоянии (1) и в пассивном режиме при напряжениях на верхнем и нижнем затворах соответственно 4.5 и 0 В (2) и наоборот (3).

Приведенные данные однозначно свидетельствуют, что наиболее удобный функциональный режим активно-открытого состояния ПДХ не годится для мониторинга магнитного поля в условиях  $\gamma$ -облучения, так как при этом с ростом дозы быстро деградирует холловская подвижность электронов в рабочем слое кремния, а следовательно, и величина холловского сигнала в определенной рабочей точке датчика. Наиболее подходящим для этой цели является режим, при котором основную часть времени датчик находится в активно-закрытом состоянии и он переводится в рабочее состояние лишь на короткий период измерения холловского сигнала.

И в заключение приведем полученные нами дозовые зависимости относительной подвижности электронов в полевых датчиках Холла, облучавшихся в различных электрических режимах. Рис. 6 демонстрирует эти зависимости для активно-открытого состояния ПДХ (кривая 1) и в пассивном режиме при положительном смещении верхнего (кривая 2) или нижнего (кривая 3) затворов. В первом случае подвижность уменьшается с ростом дозы наиболее интенсивно. Более крутое падение кривой 2 по сравнению с кривой 3 говорит о большем влиянии ионизирующего излучения на МОП-структуру верхнего затвора, чем нижнего затвора. По-видимому, это связано с меньшей толщиной верхнего слоя окисла.

#### 4. Заключение

1. В устройствах микроэлектроники на основе двухзатворной структуры М–Д–П–Д–М подвижность носителей в рабочем слое кремния определяется комбинацией продольного и поперечного электрических полей и уменьшается с ростом затворного смещения.

2. В интервале температур от 400 до примерно 100 К подвижность электронов увеличивается в соответствии с механизмом рассеяния на акустических фонах, тогда как при дальнейшем снижении температуры вплоть до 2 К подвижность падает вследствие того, что преобладающим становится кулоновское рассеяние электронов на заряженных поверхностных центрах.

3. Экспериментально показано, что в полевом датчике Холла на основе КНИ-структуры в результате  $\gamma$ -облучения уменьшается подвижность электронов, причем степень этого уменьшения сильно зависит от электрического режима датчика в процессе облучения. Наименьшее изменение подвижности при радиационном воздействии наблюдалось в активно-закрытом состоянии датчика (при включенном напряжении питания датчик закрыт отрицательным смещением на затворе), т.е. это состояние является наиболее радиационно стойким. При использовании обсуждаемых датчиков для мониторинга магнитного поля в условиях радиационного воздействия (например, в ускорителях заряженных частиц) можно рекомендовать режим, при котором основную часть времени датчик находится в активно-закрытом состоянии

и переводится в открытое состояние лишь на короткий период измерения холловского сигнала.

Авторы благодарны В.Н. Мордковичу и Д.М. Пажину (ИПТМ РАН) за интерес к работе и участие в обсуждении результатов и В.В. Тарасову (ОИЯИ) за помощь в проведении измерений при гелиевой температуре.

## Список литературы

- [1] K. Uchida, S. Takagi. Appl. Phys. Lett., **82**, 2916 (2003).
- [2] H. Sakaki, T. Noda, K. Hirakawa, M. Tanaka, T. Matsusue. Appl. Phys. Lett., **51**, 1934 (1987).
- [3] В.В. Беляков, В.С. Першенков, Г.И. Зебрев, А.В. Сокоян, А.И. Чумаков, А.И. Никифоров, П.К. Скоробогатов. Микроэлектроника, **32** (1), 31 (2003).
- [4] N.St.J. Murphy, F. Berz, I. Flinn. Sol. St. Electron., **12**, 775 (1969).
- [5] А.А. Гузев, Г.Л. Курьшев, С.П. Сеница. ФТП, **4**, 2043 (1970).
- [6] В.А. Гергель, М.В. Тимофеев, А.П. Зеленый. ФТП, **32** (6), 748 (1998).
- [7] А.Г. Акимов, М.Ю. Барабаненков, М.Л. Бараночников, А.В. Леонов, А.Д. Мокрушин, В.Н. Мордкович, Н.М. Омеляновская. ПТЭ, **5**, 123 (1998).
- [8] R.S. Popovic. *Hall Effect Devices* (Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing, 2004).

Редактор Л.В. Беляков

## The peculiarity of electrons mobility in thin Si layer of dielectric–Si–dielectric structure

A.V. Leonov, A.D. Mokrushin, N.M. Omeļjanovskaja

Institute of Microelectronics Technology  
and High Purity Materials,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

**Abstract** The mobility of electrons in thin Si layer of metal–dielectric–Si–dielectric–metal system was investigated as a function in wide range of longitudinal and transverse electrical fields values, temperature variations from 1.7 to 400 K and conditions of  $\gamma$ -irradiation. It was demonstrated that for temperature about 100–400 K mobility increased in accordance with mechanism of acoustics phonon scattering.

If the temperature decreased up to liquid helium temperature the mobility determined mostly by coulombic scattering on charged surface centers. It was demonstrated also that mobility decreased as result of  $\gamma$ -irradiation strongly depended of electrical conditions during irradiation.