

©1994 г.

## ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ Si-SiO<sub>2</sub>, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*В.М.Масловский, Ю.А.Климов, Н.С.Самсонов, Е.В.Симанович*

Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В.Лукина, 103460, Москва, Россия

(Получена 9 августа 1993 г. Принята к печати 24 ноября 1993 г.)

Исследуются изменения гистограмм значений времен релаксации  $\tau$  нестационарной емкости кремневых МДП структур, а также заряда на межфазной границе Si-SiO<sub>2</sub> после воздействия импульсного магнитного поля. Установлено появление магнитно-индуцированных долговременных изменений положения пика на гистограмме значений  $\tau$  после окончания кратковременного (менее 1 мин) воздействия, а также увеличение положительного встроенного в диэлектрик заряда. Необратимое изменение генерационного времени жизни носителей в кремнии обусловлено влиянием импульсного магнитного поля на спин-зависимые квази-химические реакции распада метастабильных примесно-дефектных комплексов с последующим образованием генерационных центров. Обнаружено, что электрическое поле в обедненном слое кремния ускоряет деградационные процессы лишь после воздействия импульсного магнитного поля. Это обусловлено миграцией в электрическом поле продуктов распада — собственных и примесных точечных дефектов.

### Введение

Ранее в [1,2] было установлено явление магнитно-индуцированного долговременного изменения реальной структуры твердотельных систем, заключающееся в возникновении долговременных изменений электрофизических свойств и структурных параметров этих систем после окончания воздействия магнитного поля. Так, например, в системах Si-SiO<sub>2</sub> наблюдалось индуцированное воздействием импульсного магнитного поля (ИМП) появление долговременных (несколько недель) изменений генерационных токов в приповерхностной области кремния, зарядового состояния межфазной границы раздела и туннельной прозрачности SiO<sub>2</sub>, коррелирующее с изменением структурных параметров [1-3].

Необычность этого явления в немагнитных полупроводниковых системах связана с двумя аспектами:

— при амплитуде использовавшихся ИМП (порядка 0.1 МА/м) энергия зеemanовского взаимодействия с магнитным моментом электрона на 3 порядка меньше тепловой энергии  $kT$ , где  $T$  — абсолютная температура,  $k$  — постоянная Больцмана;

— изменение электрофизических свойств начинается лишь после окончания воздействия (продолжительностью порядка 1 мин) и может продолжаться более недели при комнатной температуре.

Первый аспект является характерным для спин-зависимых реакций дефектов в конденсированных средах в неравновесных условиях [4]. Как известно, многокомпонентные полупроводниковые системы являются термодинамически неравновесными, так Si-SiO<sub>2</sub> структуры могут характеризоваться значительными внутренними механическими напряжениями [3]. Второй аспект — в соответствии с результатами [1,3,5] следствие долговременных диффузионных процессов, связанных с распадом примесно-дефектных комплексов во время релаксации поляризации электронно-ядерной спиновой системы. Например, экспериментально установленное время релаксации поляризации ядер <sup>71</sup>Ga составляет 27 с [6], что хорошо согласуется [5,7] с экспериментально обнаруженной [8] задержкой изменения структурных и электрофизических параметров GaAs после окончания импульса магнитного поля, которая слабо зависит от температуры. Так, например, значимое изменение температуры образца GaAs и концентрации примесно-дефектных комплексов было зарегистрировано через несколько секунд после окончания воздействия ИМП. В кремнии КЭФ-4.5 время ядерной спин-решеточной релаксации изотопов <sup>29</sup>Si порядка 1 ч [9], поэтому заметные изменения электрофизических параметров, наиболее чувствительных к состоянию ансамбля дефектов в приповерхностной области кремния — генерационных токов, было зарегистрировано лишь через несколько минут после воздействия ИМП [2,3]. Соотношение указанных времен свидетельствует в пользу механизма, предложенного в [1,3], и развитой на его основе теории [5].

В данной работе представлены новые экспериментальные результаты, позволяющие на основе изучения изменения распределения МДП структур по значениям электрофизических параметров (на основе анализа гистограмм) получить более полную и детальную картину долговременного изменения электрофизических параметров систем Si-SiO<sub>2</sub> после воздействия ИМП. Достоверность такого воздействия подтверждается изменением распределений МДП структур как по значениям генерационных времен жизни носителей, для чего регистрируются изменения гистограмм времен релаксации  $\tau$  нестационарной емкости МДП структур, измеряемым на одной пластине не менее чем у 100 структур, так и по плотности заряда на межфазной границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для исследования магнитно-индуцированных изменений электрофизических параметров систем Si-SiO<sub>2</sub> использовались МДП структуры, полученные термическим окислением кремниевой подложки КЭФ-4.5 в сухом кислороде. Толщина диоксида составляла 50 нм, площадь Al электрода — 1 мм<sup>2</sup>. Эти структуры подвергались воздействию

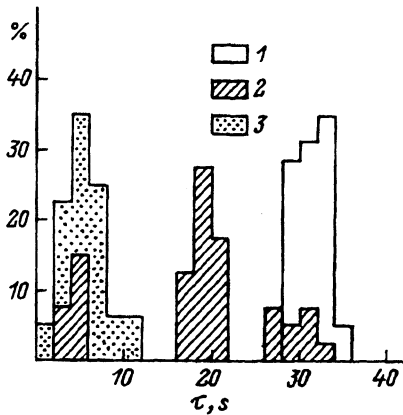


Рис. 1. Гистограммы  $\tau$  (регистрировались у 100 МДП структур на одной пластине) до и после воздействия ИМП: 1 — исходные структуры, 2 — через 4 сут, 3 — через 10 сут.

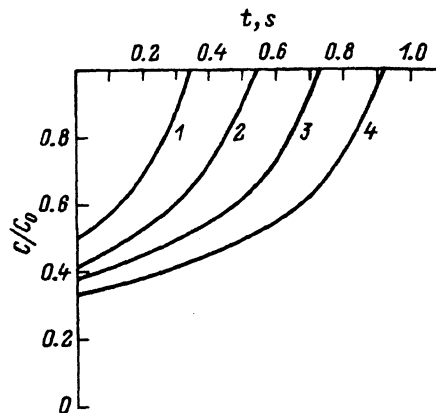


Рис. 2. Семейство типичных  $C(t)$ -характеристик через 10 сут после воздействия для различных значений  $V, B$ : 1 — 3, 2 — 4, 3 — 5, 4 — 6.

ИМП с амплитудой 0.1–0.2 МА/м, длительностью 1 мс, временем фронтов 10–30 мкс и частотой следования 10 Гц. Проводилось измерение времен релаксации  $\tau$  нестационарной емкости одних и тех же МДП структур до (дважды) и после воздействия ИМП. На рис. 1 отражено распределение МДП структур по значениям времен релаксации  $\tau$  нестационарной емкости МДП структуры после приложения импульса обедняющего напряжения. Оказалось, что основной пик на гистограмме  $\tau$  после воздействия ИМП смещается в сторону меньших значений, что соответствует увеличению тока генерации носителей в приповерхностной области (через 8 сут значение  $\tau$ , соответствующее пику на гистограмме рис. 1, уменьшилось в 5–7 раз). Характер временной зависимости релаксации емкости  $C(t)$  МДП структуры в режиме постоянного напряжения  $V$  на структуре отражен на рис. 2. Следует отметить, что вид этой зависимости не изменился после воздействия ИМП и соответствовал генерации носителей в области пространственного заряда [10]. Действительно, зависимость  $C^{-1}(t)$  хорошо соответствовала линейной, откуда следует, что толщина области обедненного слоя  $W(t)$  линейно уменьшается со временем после приложения импульса обедняющего напряжения  $W(t) = W(0) - \beta t$ , где  $\beta = [W(0) - W_0]/\tau$ ,  $W_0$  — равновесная толщина обедненного слоя. Плотность тока генерации неосновных носителей  $G(t) = qn_i/\tau_g W(t)$ , где  $q$  — величина заряда электрона,  $n_i$  — собственная концентрация электронов в кремнии,  $\tau_g$  — генерационное время жизни неосновных носителей [10]. За время релаксационного процесса в инверсионном слое накапливается заряд  $C_d(V + V_{fb}) = \int_0^\tau G(t)dt$ , где  $C_d$  — удельная емкость диэлектрического слоя,  $V_{fb} < 0$  — напряжение плоских зон. Отсюда выражение для генерационного времени жизни имеет вид:

$$\tau_g = \tau \frac{n_i}{C_d n} \left\{ C(0)^{-1} - C_0^{-1} \right\}^{-2} \left\{ C(0)^{-1} + C_0^{-1} - \frac{2}{C_d} \right\},$$

где  $n$  — концентрация основных носителей в кремнии. При использовании импульса обедняющего напряжения одинаковой величины  $V$  время

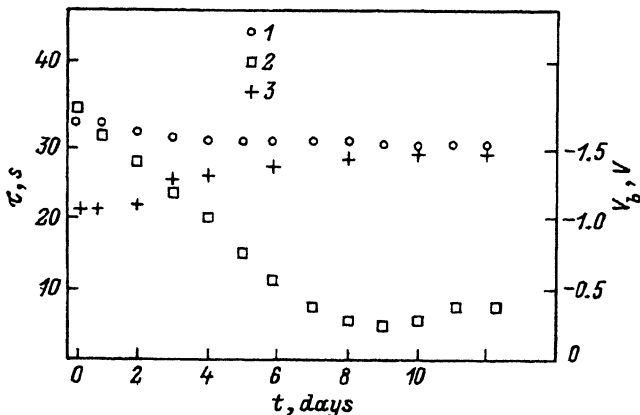


Рис. 3. Изменение положения основного пика на гистограммах  $\tau$  и  $V_{fb}$  во времени до и после воздействия ИМП: 1 —  $\tau$  до воздействия, 2 —  $\tau$  после воздействия, 3 —  $V_{fb}$  после воздействия.

релаксации нестационарной емкости  $\tau \sim \tau_g \sqrt{n}$  и его уменьшение связано с уменьшением генерационного времени жизни, обусловленным монотонным увеличением концентрации генерационных центров в приповерхностной области полупроводника. Аналогичное значительное увеличение концентрации генерационных центров в полупроводниковых соединениях  $A^{III}B^V$  после воздействия импульса магнитного поля было установлено в [8].

Воздействие ИМП на МДП структуры наряду с уменьшением  $\tau_g$  приводит также к увеличению плотности встроенного в диэлектрик заряда, регистрируемому по сдвигу напряжения плоских зон в отрицательную область (рис. 3). Высокочастотные вольт-фарадные характеристики сдвигались по оси напряжений без изменения формы. Отметим, что аналогичные долговременные изменения плотности заряда на межфазной границе Si-SiO<sub>2</sub> также наблюдались в [11] после такой же обработки ИМП серийных МОП транзисторов. Следует заметить, что результаты (рис. 3) свидетельствуют о том, что изменение плотности встроенного заряда проявляется позднее регистрируемых изменений времен  $\tau$ . Это подтверждает вывод [1,3] о контролируемой диффузией реакции дефектов на межфазной границе после воздействия ИМП.

Другой новый результат заключается в том, что продолжительное воздействие электрического поля в обедненной области полупроводника значительно ускоряет процесс магнито-индуцированного изменения ансамбля дефектов в приповерхностной области полупроводника. Многократное приложение обедняющего напряжения к одной и той же МДП структуре для измерения  $C(t)$ -характеристик после воздействия на эту структуру ИМП приводит к значительно более быстрому и немонотонному изменению времени  $\tau$  (рис. 4) и увеличению встроенного в диэлектрике положительного заряда по сравнению с долговременными изменениями, отраженными на рис. 3. Интервал времени между измерениями  $\tau$  и, соответственно, между повторными приложениями обедняющего напряжения составлял 3 мин. Такое же многократное и длительное приложение к МДП структуре обедняющего напряжения

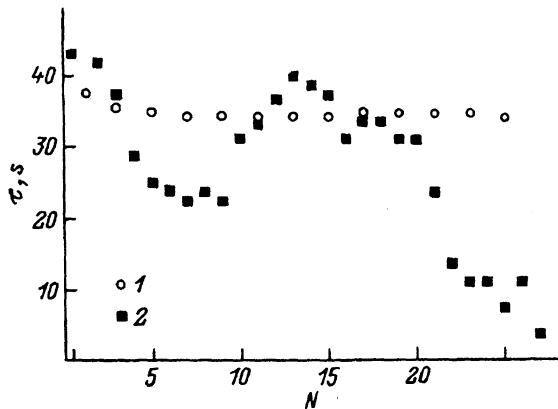


Рис. 4. Типичная зависимость  $\tau$  от номера в последовательности его многократных измерений: 1 — до воздействия ИМП, 2 — после воздействия.

до воздействия ИМП не приводило к заметным изменениям  $\tau$ . Обнаруженный эффект подтверждает возможность магнитно-индуцированного изменения ансамбля дефектов в кремнии, так как сильное электрическое поле в обедненной области ускоряет миграцию образовавшихся дефектов.

Появление быстро диффундирующих примесных и собственных дефектов связывается с распадом метастабильных комплексов в полупроводнике во время релаксации поляризации электронно-ядерной спиновой системы после окончания воздействия ИМП [1,5,7]: взаимодействие спинов локализованных электронов и ядер увеличивает населенность возбужденных триплетных состояний примесно-дефектных комплексов. Увеличение населенности возбужденных триплетных состояний дефектного комплекса смещает спин-зависимую реакцию дефектов, вызванную тепловыми колебаниями решетки, в сторону распада комплексов, поскольку реакция образования дефектной молекулы может происходить только из радикальной пары в синглетном состоянии [4]. После воздействия ИМП ядерная спиновая система находится в неравновесном состоянии, что, вследствие сверхтонкого взаимодействия, изменяет вероятности синглетно-триплетных переходов в радикальных парах, а следовательно, и скорость квазихимических реакций дефектов. Поскольку такое изменение происходит в основном после выключения ИМП [5,7], поляризация ядер позволяет запомнить воздействие ИМП, так как время ее релаксации на много порядков больше времени релаксации электронной спиновой системы.

После воздействия ИМП могут распадаться известные метастабильные комплексы кислорода и углерода с переходными металлами и собственными дефектами [12,13]. В результате распада образуются неравновесные собственные и примесные точечные дефекты, часть которых участвует в квазихимических реакциях образования электрически активных центров (как донорных, так и генерационно-рекомбинационных). Эти дефекты мигрируют в полях упругих напряжений в приповерхностной области полупроводника и вступают в реакции с другими дефектами, что приводит к образованию новых генерационных центров. Так, например, результаты [14] свидетельствуют об уменьшении времени жизни неосновных носителей при увеличении концентрации дефектов межузельного и вакансионного типов.

Одним из возможных, образующихся после воздействия ИМП центров является известный генерационный комплекс COVV (где V — вакансия) [12], который формируется при взаимодействии известных парамагнитных А-центров (OV) с атомами узлового углерода С [15]. Другая часть собственных и примесных точечных дефектов геттерирована границей раздела Si-SiO<sub>2</sub>, что приводит к изменению ее зарядового состояния [3]. Процесс диффузионного транспорта и геттерирования неравновесных дефектов и определяет долговременный характер магнитно-индуцированных изменений электрофизических параметров систем Si-SiO<sub>2</sub>.

## Выводы

Воздействие ИМП на МДП структуру индуцирует долговременные необратимые изменения генерационного времени жизни носителей в приповерхностной области кремния и зарядового состояния междофазной границы Si-SiO<sub>2</sub>. Установлено, что электрическое поле в обедненном слое полупроводника ускоряет деградационные процессы лишь после воздействия ИМП, что связывается с миграцией в электрическом поле продуктов распада — собственных и примесных точечных дефектов. Полученные результаты согласуются с представлением об изменении дефектной структуры приповерхностной области, обусловленной релаксацией поляризации электронно-ядерной спиновой системы, влияющей на спин-зависимые квазихимические реакции образования и распада примесно-дефектных комплексов.

## Список литературы

- [1] В.М. Масловский, С.Н. Постников. Матер. IV межд. науч.-техн. сем. по нетрадиционным технологиям, Ботевград-1989, 5. София-Горький (1989).
- [2] Ю.А. Климов, В.М. Масловский, В.В. Минаев, С.Н. Постников. Матер. VI Всес. конф. по физике диэлектриков, сер. 6, Материалы, вып. 5 (281), 50 (1988).
- [3] Ю.А. Климов, В.М. Масловский, В.В. Тарасенко. Электрон. техн., сер. 3, Микроэлектроника, вып. 5 (139), 20(1990).
- [4] Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич. УФН, 155, 3 (1988).
- [5] Ю.А. Климов, В.М. Масловский, К.В. Холоднов. Электрон. техн., сер. 3, Микроэлектроника, вып. 5 (144), 22 (1991).
- [6] П.Ю. Ефиценко, И. Мавлоназаров, В.М. Микушев, Е.В. Чарная. ФТТ, 34, 1753 (1992).
- [7] Kholodnov K.V., V.M. Maslovsky, N.S. Samsonov. Mater. Res. Soc. Fall Meeting, Abstracts, 133 (1992).
- [8] В.Н. Давыдов, Е.А. Лоскутова, Е.П. Найден. ФТП, 23, 1596 (1989).
- [9] Н.Т. Баграев, Л.С. Власенко. ФТТ, 21, 120 (1979).
- [10] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев (1978).
- [11] А.Г. Кадменский, С.Г. Кадменский, М.Н. Левин, В.М. Масловский, В.Е. Чернышев. Письма в ЖТФ, 19, 41 (1993).
- [12] Y.H. Lee, J.W. Corbett, K.L. Brower. Phys. St. Sol. (a), 41, 637 (1977).
- [13] Г.С. Мьякенькая, Г.Л. Гуцев. ФТП, 27, 391 (1993).
- [14] Ю.В. Выжигин, Н.А. Соболев, Б.Н. Грессеров, Е.И. Шек. ФТП, 26, 1938 (1992).
- [15] П.Ф. Лугаков, В.В. Лукьяница. ФТП, 24, 1721 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев