

УДК 621.382.2

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ПАССИВИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВУХСЛОЙНЫМИ ПЛЕНКАМИ ИЗ ОКСИДОВ ГАДОЛИНИЯ И ДИСПРОЗИЯ

© 2004 В.А. Рожков, М.А. Родионов,¹ А.В. Пашин²

Исследованы рекомбинационные свойства кремния, пассивированного двухслойными диэлектрическими пленками из оксида гадолиния и оксида диспрозия. Установлено, что после нанесения двухслойной пленки из оксидов редкоземельных элементов эффективное время жизни неравновесных носителей заряда, измеренное методом релаксации нестационарной фотопроводимости, возрастает в 2–3 раза. Определены величины скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела "кремний-оксид" редкоземельного элемента.

В современной микроэлектронике широкое применение получили металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) транзисторы. Это связано, в первую очередь, с простотой конструкции МДП-транзистора и высокой плотностью упаковки элементов в изготавливаемых на его основе интегральных схемах. Кроме того, все типы МДП-транзисторов являются униполярными, так как токи в них переносятся носителями заряда одного знака, что дает возможность данному классу приборов работать на высоких частотах. Все это определило большое значение МДП-транзисторов для электронной промышленности, особенно при производстве цифровых схем. Следует отметить, что подзатворный диэлектрический слой МДП-транзистора должен удовлетворять высоким требованиям, основными из которых являются высокая электрическая прочность, малые токи утечки, устойчивость к внешним воздействиям, а также возможность получения границы раздела с полупроводником, обладающей низкими рекомбинационными потерями. К наиболее перспективным диэлектрическим материалам для создания подзатворного диэлектрика МДП-транзистора относятся оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ), которые характеризуются высокой химической и термической стойкостью, большими значениями диэлектрической проницаемости

¹Рожков Виктор Аркадьевич (rozkov@ssu.samara.ru), Родионов Максим Александрович (rodionow@rambler.ru), кафедра электроники твердого тела Самарского государственного университета, 443011, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

²Пашин Алексей Владимирович (Pashin@ssaba.smr.ru), кафедра физики Самарской архитектурно-строительной академии, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194.

($\epsilon=8-20$), удельного сопротивления ($\rho = 10^{13}-10^{16}$ Ом·см) и пробивных напряжений, обладают хорошей адгезией к поверхности кремния. Кроме того, на основе оксидов РЗЭ возможно изготовление двухслойных диэлектрических пленок [1], применение которых позволяет заметно улучшить электрическую стабильность изготавливаемых приборов, в том числе и МДП-транзисторов. Однако до настоящего времени остаются не изученными рекомбинационные характеристики кремния, покрытого двухслойной пленкой из оксидов РЗЭ. В связи с этим целью данной работы являлось изучение эффективного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда в пластинах кремния, пассивированных двухслойными диэлектрическими пленками из оксида гадолиния и оксида диспрозия.

Исследуемые образцы вырезались из полированных пластин монокристаллического кремния марки КЭФ-20 с ориентацией (100) и имели характерные размеры $10 \times 5 \times 0,36$ мм. Перед изготовлением пленок оксидов РЗЭ часть кремниевых пластин проходила ультразвуковую мойку в ацетоне в течение 10 минут, другая часть образцов для снятия естественного оксида подвергалась химической обработке, состоящей из травления в водном растворе плавиковой кислоты состава $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10). В некоторых случаях после этой обработки образцы кипятились в перекисно-аммиачном растворе (ПАР) следующего состава: $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:3). После каждой обработки образцы многократно промывались в бидистиллированной воде и сушились на фильтре. Двухслойные металлические пленки наносились на обе поверхности кремниевой пластины методом термического распыления редкоземельного металла в вакууме при давлении $(2-3) \cdot 10^{-5}$ Тор из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. На каждую сторону кремниевой подложки последовательно напылялись слои гадолиния и диспрозия. Полученные пленки РЗЭ окислялись в трубчатой муфельной печи типа СУОЛ-0.4.4 на воздухе при температуре 620°C в течение 40 мин. В качестве омических контактов использовались слои диспрозия и алюминия, последовательно нанесенные на кремниевые образцы через трафарет методом термического распыления в вакууме.

Для измерения эффективного времени жизни τ_{eff} использовался широко применяемый метод релаксации нестационарной фотопроводимости при освещении образца прямоугольными импульсами света [2]. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 1. В качестве источника света применялся фосфидогаллиевый светодиод типа АЛ-106А, на который подавались прямоугольные импульсы тока с частотой повторения 1 кГц от генератора Г5-6А. Кинетика падения напряжения на образце R_0 измерялась с помощью осциллографа типа С1-99.

Известно [2], что величина эффективного времени жизни определяется совместным действием процессов рекомбинации и захвата носителей в объеме и на поверхности полупроводника. Наличие ловушек для носителей заряда может оказывать существенное влияние на постоянную време-

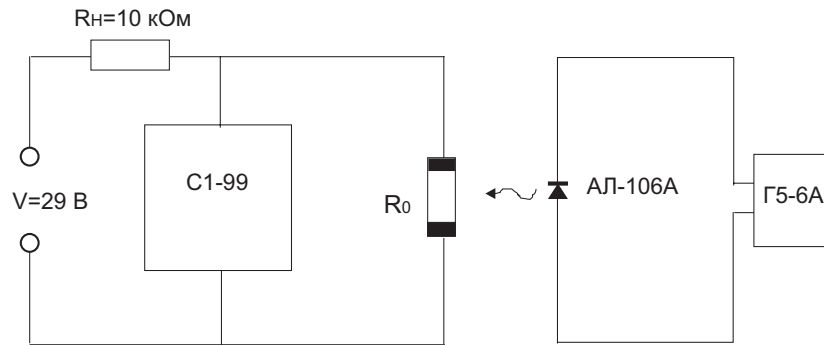


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения эффективного времени жизни

ни процесса затухания фотопроводимости, измеряемую с помощью данного метода, вследствие чего получаемое время жизни носителей оказывается больше реального значения. Для выяснения роли процессов захвата на релаксацию фотопроводимости исследовалась кинетика роста падения напряжения на образце после отключения светового возбуждения, обусловленная рекомбинацией неравновесных носителей заряда. По результатам эксперимента строилась зависимость от времени величины $\Delta V(t) = V_0 - V(t)$, где V_0 — падение напряжения на образце в состоянии равновесия, $V(t)$ — падение напряжения на образце при наличии неравновесных носителей заряда. На рис. 2 представлена указанная характеристика в полулогарифмических координатах $\ln \frac{\Delta V(t)}{\Delta V_0}$ от t , где ΔV_0 — максимальное значение ΔV .

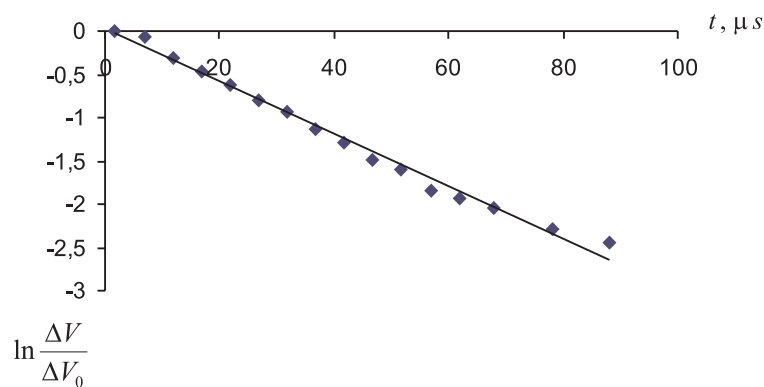


Рис. 2. Кинетика уменьшения разности между равновесным и неравновесным падениями напряжения на образце

Как видно из рисунка, характеристика в указанных координатах спрямляется. Данный результат свидетельствует о том, что весь процесс релаксации фотопроводимости характеризуется единственным экспоненциальным законом с одной постоянной времени релаксации и определяется лишь гене-

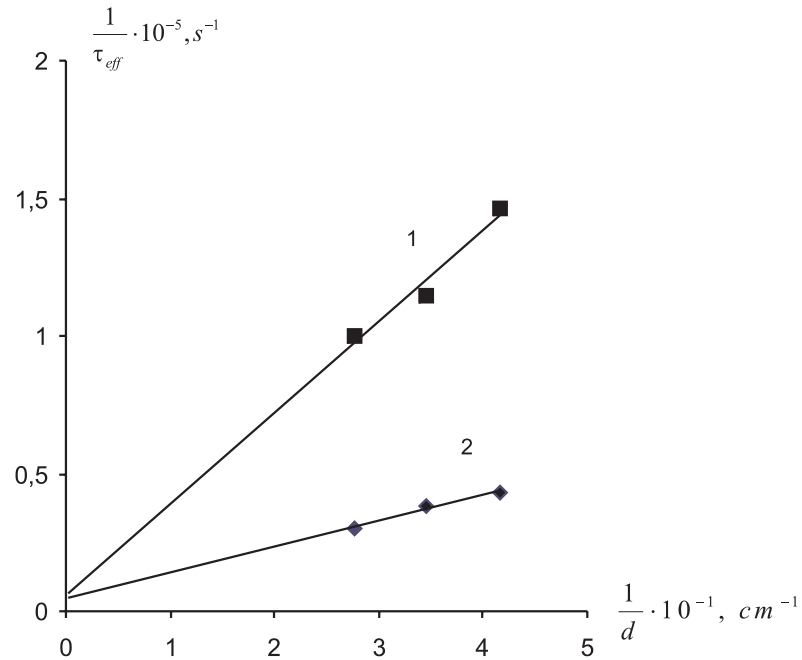


Рис. 3. Зависимость эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда от толщины кремниевой подложки с реальной (1) и пассивированной поверхностью двухслойной пленкой из Gd_2O_3 и Dy_2O_3 (2)

рационно-рекомбинационными процессами, а захватом неравновесных носителей заряда на границе раздела "кремний-оксид" РЗЭ можно пренебречь. В этом случае для эффективного времени жизни тонких образцов при сравнительно малой скорости поверхностной рекомбинации справедливо соотношение [3]:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{2S}{d},$$

где τ_0 — время жизни неравновесных носителей заряда в объеме полупроводника, d — толщина полупроводника, S — скорость поверхностной рекомбинации. Эта формула позволяет найти значение скорости поверхностной рекомбинации, если известно объемное время жизни.

Для определения объемного времени жизни использовалась зависимость эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда от толщины полупроводникового образца. На рис. 3 представлена указанная зависимость, полученная из измерений τ_{eff} , для образцов разной толщины, которые изготавливались путем травления кремния в травителе СР-8, состоящем из смеси азотной и плавиковой кислот в соотношении 3:1. Экспериментальные значения хорошо укладываются на прямую в координатах $\frac{1}{\tau_{eff}}$ от $\frac{1}{d}$. Данный результат свидетельствует о постоянстве скорости по-

верхностной рекомбинации у образцов разной толщины. Этого следовало ожидать, учитывая одинаковые условия обработки поверхности в процессе изготовления образцов. Оценка объемного времени жизни, проведенная из экспериментальных зависимостей, дает значения $\tau_0 \geq 200$ мкс для всех исследованных образцов.

Определение скорости поверхностной рекомбинации проводилось из измерений эффективного времени жизни. Так как измеренные величины эффективного времени жизни не превышали 40 мкс и выполнялось неравенство $\frac{1}{\tau_{eff}} \gg \frac{1}{\tau_0}$, то в выражении для скорости поверхностной рекомбинации величиной $\frac{1}{\tau_0}$ пренебрегали. В таблице представлены полученные значения скорости поверхностной рекомбинации и эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых образцах, прошедших различную обработку, до и после нанесения пленок оксидов РЗЭ.

Таблица

**Значения эффективного времени жизни и скорости
поверхностной рекомбинации в кремнии**

Материал пленки	Вид обработки поверхности кремния	τ_{eff} , мкс	S, см/с
Без пленки	HF:H ₂ O	8-10	2250-1800
Без пленки	HF:H ₂ O+ПАР	10-12	1800-1500
Без пленки	Ультразвуковая мойка	10-12	1800-1500
Gd ₂ O ₃ -Dy ₂ O ₃	HF:H ₂ O	28-30	640-600
Gd ₂ O ₃ -Dy ₂ O ₃	HF:H ₂ O+ПАР	35-40	510-450
Gd ₂ O ₃ -Dy ₂ O ₃	Ультразвуковая мойка	30-32	600-560

Приведенные результаты свидетельствуют об увеличении значений эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда и уменьшении величин скорости поверхностной рекомбинации при нанесении пленок оксидов РЗЭ. Причем наибольшее возрастание τ_{eff} достигается для образцов, прошедших перекисно-аммиачную обработку. Сравнение полученных рекомбинационных характеристик показывает, что скорость поверхностной рекомбинации в системе Si-Gd₂O₃-Dy₂O₃ на 1–2 порядка меньше аналогичного параметра в широко применяемых в полупроводниковой электронике структурах Si-SiO₂ и Si-SiO₂-Si₃N₄ [4, 5].

Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность использования двухслойных диэлектрических пленок оксидов РЗЭ в качестве подзатворного диэлектрического слоя полевого МДП-транзистора и пассивирующих покрытий полупроводниковых приборов.

Литература

- [1] Родионов М.А. Электрофизические свойства кремниевых МДП-структур с диэлектрическими пленками из оксида иттербия и диспрозия: Тез. докл. V Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Спб: Из-во СПбГПУ, 2003. С. 111.
- [2] Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент // Пер. с англ.; Под ред. М.М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 278 с.
- [3] Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971. 480 с.
- [4] Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев: Наукова думка, 1978. 316 с.
- [5] Саченко А.В., Новоминский Б.А., Калшабеков А.С. Тез. докл. XII Всесоюз. научн. конф. по микроэлектронике. Тбилиси, 1987. Ч. 3. С. 143.

Поступила в редакцию 3/II/2004;
в окончательном варианте — 3/II/2004.

RECOMBINATION PROPERTIES OF SILICON PASSIVATED BY DIELECTRIC DOUBLE-LAYERED GADOLINIUM OXIDE AND DYSPROSIUM OXIDE FILMS

© 2004 V.A. Rozhkov, M.A. Rodionov,³ A.V. Pashin⁴

The recombination properties of silicon passivated by the two-layered inductive gadolinium oxide and dysprosium oxide films are studied. It is determined that after putting the two-layered film made from the oxides of the rare-earth elements the life time of the non-equilibrium charge transmitters, measured by using the relaxation method of non-stationary photoconductivity, increases twice or trice. The speed of surface recombination at the border of section silicon-oxide of the rare-earth element is estimated.

Paper received 3/II/2004.

Paper accepted 3/II/2004.

³Rozhkov Victor Arkad'evich (rozkov@ssu.samara.ru), Rodionov Maksim Alexandrovich (rodionow@rambler.ru), Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.

⁴Pashin Alexey Vladimirovich (Pashin@ssaba.smr.ru), Dept. of Physics, Samara State Academy of Architecture and Building, Samara, 443001, Russia.