

Влияние сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения на параметры структур металл–диэлектрик–полупроводник

© В.А. Терехов[¶], А.Н. Манько, Е.Н. Бормонтов, В.Н. Левченко, С.Ю. Требунских, Е.А. Тутов, Э.П. Домашевская

Воронежский государственный университет,
394006 Воронеж, Россия

(Получена 6 апреля 2004 г. Принята к печати 11 мая 2004 г.)

Исследованы изменения в структурах Al/SiO₂/Si, возникающие в результате воздействия импульсным электромагнитным излучением с длительностью переднего фронта импульса $1.4 \cdot 10^{-9}$ с и с общей длительностью импульса $\sim 11.5 \cdot 10^{-9}$ с, частотой следования импульсов 10 кГц и различной энергией в импульсе ($\lesssim 2.4 \cdot 10^{-4}$ Дж). Измерены вольт-фарадные характеристики таких структур до, во время и после воздействия сверхкороткими импульсами. В зависимости от энергии импульса обнаружены изменения во время воздействия, связанные с перестройкой неравновесной дефектной структуры границы раздела с полупроводником и поляризацией диэлектрика, а также необратимые изменения, связанные с пробоем, наблюдаемые и после выключения воздействия.

1. Введение

Современные достижения в области техники генерации электромагнитного излучения (ЭМИ) позволяют реализовать видеопульсы с большой пиковой мощностью с нано- и пикосекундной длительностью [1–3], соизмеримой с характеристическими временами отклика диэлектрических, полупроводниковых и металлических материалов, составляющих материальную базу современной радиоэлектронной аппаратуры.

Фундаментальные процессы нестационарного нелинейного преобразования энергии мощных сверхкоротких импульсов (СКИ) электромагнитного излучения в энергию отклика полупроводниковых и диэлектрических материалов коренным образом отличаются по своему характеру от достаточно хорошо изученного взаимодействия этих материалов с гармоническим или импульсным ЭМИ большой длительности, когда переходные процессы несущественны.

Сложность построения математического аппарата для адекватного описания процессов взаимодействия СКИ с различными материалами и структурами приводит к тому, что на данном этапе развития этого научного направления приоритетными являются экспериментальные исследования.

В подавляющем большинстве современных устройств полупроводниковой микроэлектроники активной действующей областью приборов является очень тонкий слой полупроводника, приповерхностная область или граница раздела двух сред. МДП структуры являются удобными тестовыми объектами как при контроле технологических процессов, так и для выяснения механизмов электронных процессов, протекающих в приповерхностных слоях полупроводника и диэлектрика при различных внешних воздействиях [4].

Для сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения (как непрерывного, так и импульсного различной длительно-

сти) проведено достаточно много исследований по воздействию на материалы и приборные структуры [5–11]. Было установлено, что при ударном воздействии ЭМИ изменения параметров изучаемых объектов могут иметь как временный характер, наблюдаемый во время воздействия или сразу после его снятия, так и устойчивый характер изменения рабочих параметров структур, наблюдаемых в течение длительного времени после выключения воздействия. При этом были получены следующие результаты исследований воздействия СВЧ ЭМИ на МДП структуры [5–11].

— проявление максимальных воздействий в ударных полях, имеющих наибольшие градиенты;

— деградационные, поляризационные и ионизационные эффекты в ударных полях проявляются при существенно более низких уровнях энергии, чем в стационарных полях;

— наименее устойчивыми к облучению являются неоднородные полупроводниковые структуры, имеющие встроенные электрические поля и границы раздела, содержащие диэлектрические и металлические области.

Основной задачей данного исследования было выявление изменений вольт-фарадных характеристик (ВФХ) тестовых МДП структур Al/SiO₂/Si, возникающих под действием СКИ ЭМИ.

2. Экспериментальная часть

В качестве тестовых были использованы структуры, изготовленные на кристаллическом кремнии марки КЭФ-4.5 (100) с термическим окислом толщиной 125 нм и алюминиевыми управляющими электродами (затворами) диаметром 0.8 мм, нанесенными методом вакуумной конденсации. Высокочастотные вольт-фарадные характеристики измеряли на частоте 1 МГц при амплитуде тестового сигнала 25 мВ с помощью измерителя Е7-12. Смещение, подаваемое на структуру, регулировалось в диапазоне от –15 до +15 В при помощи блока питания

[¶] E-mail: root@ftt.vsu.ru

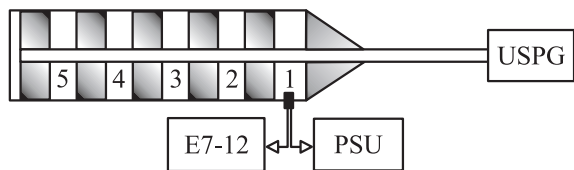


Рис. 1. Схема измерений вольт-фардных характеристик МДП структур в поле генератора СКИ (USPG — ultra short pulse generator). PSU — блок питания (power supply unit).

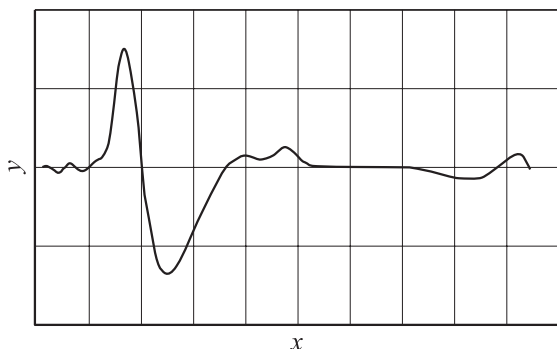


Рис. 2. Оциллограмма биполярного импульса от генератора СКИ с энергией $2.4 \cdot 10^{-4}$ Дж. По оси $y = 1$ В/дел., коэффициент ослабления — 800 раз; по оси $x = 5$ нс/дел.

GPC-3030DQ. Так как СКИ ЭМИ могут существенно нарушать работу измерительной аппаратуры, тестовые структуры помещались в согласованную широкополосную коаксиальную нагрузку, позволяющую снизить уровень сигнала на внешних устройствах на 60 дБ. Внутренний объем коаксиальной нагрузки заполнен специальным поглотителем, позволяющим в совокупности с позиционными окнами, расположенными вдоль нагрузки, помещать объект в поле с разной энергией. На рис. 1 показана схема измерений ВФХ МДП структур в поле генератора СКИ с различной амплитудой и энергией, определяемой номером окон 1–5. В данных экспериментах использовался генератор, задающий биполярный импульс с длительностью переднего фронта $1.4 \cdot 10^{-9}$ с, заднего фронта — $3.2 \cdot 10^{-9}$ с и временем переключения полярности $2.8 \cdot 10^{-9}$ с, изображенный на рис. 2, с частотой следования 10 кГц. Энергия импульса на выходе генератора составляла $2.4 \cdot 10^{-4}$ Дж. В 1-м окне согласованной коаксиальной нагрузки энергия импульса составляла $2.5 \cdot 10^{-5}$ Дж.

3. Результаты и их обсуждение

Измерение ВФХ МДП структур позволяет оценить качество диэлектрического слоя и его границы раздела с полупроводником, в том числе величину и знак эффективного заряда, плотность поверхностных состояний, наличие токов утечки [12], т.е. те параметры, которые определяют работу полевых транзисторов и интегральных схем на их основе.

На рис. 3 представлены типичные ВФХ МДП структур, полученные до воздействия и во время воздействия СКИ ЭМИ с энергией $E = 1.3 \cdot 10^{-5}$ Дж. На рис. 4 приведены ВФХ такой же тестовой МДП структуры, полученные при разных энергиях СКИ ЭМИ. Как видно из этих рисунков, под воздействием СКИ емкость структур повышается во всей области измерений, однако это увеличение зависит от знака и величины приложенного смещения. В области обогащения основными носителями (положительное смещение), когда емкость МДП структуры равна емкости диэлектрика, наблюдается почти параллельное увеличение емкости, а в областях малых и отрицательных смещений наблюдается увеличение емкости с изменением наклона ВФХ. При этом максимальное относительное изменение емкости наблюдается примерно при значении смещения 1.5–2 В. Увеличение энергии СКИ приводит к непараллельному росту емкости структуры во всей области смещений (рис. 4). После прекращения воздействия СКИ таких энергий ВФХ исследуемой МДП структуры практически совпадают с исходной (рис. 4).

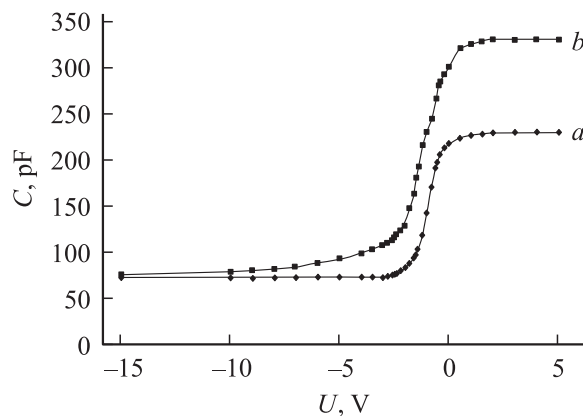


Рис. 3. Вольт-фардные характеристики МДП структуры: a — до воздействия СКИ, b — во время воздействия СКИ с энергией $E = 1.3 \cdot 10^{-5}$ Дж.

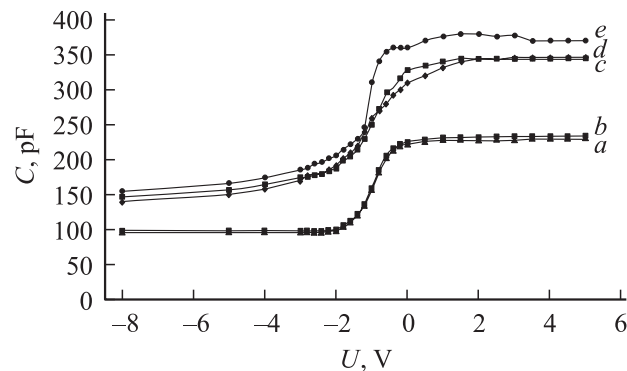


Рис. 4. Вольт-фардные характеристики МДП структуры: a — до воздействия СКИ, b — после воздействия СКИ, c – e — при воздействии СКИ с энергией E , Дж: c — $1.2 \cdot 10^{-5}$, d — $1.3 \cdot 10^{-5}$, e — $2.5 \cdot 10^{-5}$.

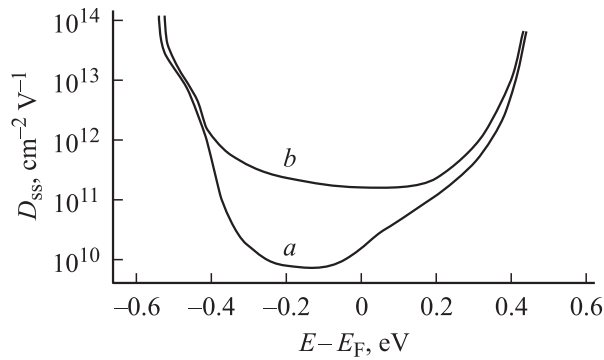


Рис. 5. Спектральная плотность поверхностных состояний D_{ss} МДП структуры на границе раздела Si-SiO₂ под воздействием излучения (b) и без воздействия (a). E_F — уровень Ферми.

Для анализа влияния СКИ ЭМИ на МДП структуры были рассчитаны некоторые электрофизические параметры с использованием стандартной обработки ВФХ [12,13].

Для исходной структуры до воздействия на нее СКИ были определены следующие параметры:

- концентрация донорной примеси $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
- толщина подзатворного диэлектрика $d_{ox} = 125 \text{ нм}$;
- напряжение плоских зон $V_{FB} = -0.7 \text{ В}$;
- эффективный поверхностный заряд $Q_{ss}^* = 1.5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$;
- эффективная плотность поверхностных состояний $N_{ss}^* \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Во время воздействия СКИ с $E = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ (рис. 3) эта же структура имеет параметры:

- $V_{FB} = -1 \text{ В}$;
- $Q_{ss}^* = 3.5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$;
- $N_{ss}^* \approx 2.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

При этом заряд поверхностных состояний положителен, так как смещение ВФХ происходит в сторону отрицательных напряжений.

На рис. 5 показано изменение величины спектральной плотности (D_{ss}) поверхностных состояний (ПС) на границе раздела Si-SiO₂. Из него следует, что под воздействием излучения энергетическая плотность ПС возрастает примерно на порядок.

Подчеркнем, что приведенная выше интерпретация изменения зависимостей C-V под воздействием СКИ ЭМИ следует из стандартного способа обработки ВФХ и является одной из возможных интерпретаций. Наблюдаемые изменения можно объяснить также с помощью модели случайных флуктуаций поверхностного электростатического потенциала полупроводника ψ_s [14,15]. Возрастание амплитуды флуктуаций и их дисперсии под воздействием излучения СКИ выглядит достаточно правдоподобно и хорошо согласуется с наблюдаемым экспериментально растягиванием кривой C-V вдоль оси напряжений.

Наиболее неясным остается значительное увеличение уровня максимальной емкости структуры примерно на 40%, наблюдаемое при воздействии СКИ с энергией $E = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, в режиме обогащения основными носителями, так как в этом режиме полная емкость структуры определяется только геометрической емкостью диэлектрического слоя:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d_{ox}}.$$

Наблюдаемое изменение C_{ox} соответствует возрастанию диэлектрической постоянной оксида кремния от значения 3.9 до значений примерно 5, 6. Возможно, этот рост вызван достаточно сильной поляризацией атомов кремния и кислорода при прохождении СКИ достаточно большой амплитуды, обуславливающей увеличение ϵ_{ox} . При уменьшении энергии и амплитуды СКИ возрастание C_{ox} становится заметно меньше (рис. 4). При энергии импульса $E = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$ добавка к C_{ox} составляет примерно 5–7%. Достаточно сильная зависимость изменения емкости диэлектрика МДП структуры от амплитуды СКИ может свидетельствовать о существенном вкладе поляризационного фактора в изменение ее величины.

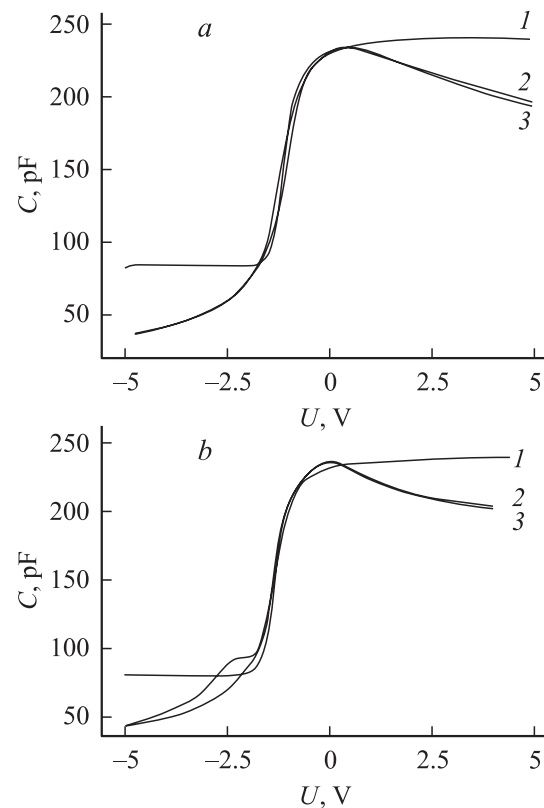


Рис. 6. Вольт-фарадные характеристики МДП структур до и после облучения СКИ ЭМИ с энергией $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$. a: 1 — до облучения, 2 — сразу после облучения в течение 10 мин, 3 — через сутки после облучения. b: 1, 3 — то же, что и на рис. a; 2 — сразу после облучения в течение 2 мин (проявление локального уровня быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ сразу после воздействия СКИ).

При увеличении амплитуды и энергии СКИ до $E = 2.5 \cdot 10^{-5}$ Дж начинают наблюдаться эффекты сквозного пробоя диэлектрика, проявляющиеся в спаде $C_{ок}$ с увеличением смещения на МДП структуре. При увеличении энергии СКИ примерно на порядок, до $\sim 2.4 \cdot 10^{-4}$ Дж, могут наблюдаться необратимые изменения в ВФХ МДП структур. Эти эксперименты проводились нами в полосковой нагрузке без поглотителя [16]. На рис. 6, а представлены ВФХ МДП структур, на которых после воздействия СКИ ЭМИ большой энергии в течение 10 мин проявляются токи утечки как основных, так и неосновных носителей заряда. На рис. 6, б представлен редкий случай деградации МДП структуры под воздействием СКИ также с энергией $2.4 \cdot 10^{-4}$ Дж. Здесь двухминутное облучение наряду с возникновением токов утечки неосновных носителей привело к появлению достаточно выраженного максимума на экспериментальной ВФХ МДП структуры. Наличие такого максимума свидетельствует о возникновении под действием СКИ локального уровня быстрых поверхностных состояний (успевающих реагировать на частоте измерения емкости — 1 МГц) на границе раздела Si-SiO₂. Рассчитав теоретическую ВФХ соответствующей идеальной МДП структуры и прокалибровав ее по поверхностному потенциалу ψ_s , можно оценить положение этого уровня [12,13], которое оказалось равным на ~ 0.3 эВ выше потолка валентной зоны. Концентрация локальных центров на этом уровне сразу после облучения СКИ ЭМИ составляла величину $3 \cdot 10^{11}$ см⁻³. После снятия воздействия наблюдаемый емкостной пик уменьшается примерно в течение часа, после чего ВФХ в этой области напряжений становится такой же, как и на рис. 6, а.

Таким образом, под воздействием СКИ ЭМИ в МДП структурах происходит увеличение емкости диэлектрика, зависящее от энергии СКИ, и при достаточно большой энергии ($> 2.5 \cdot 10^{-5}$ Дж) возможен сквозной пробой диэлектрика. Кроме того, наблюдается существенное возрастание плотности поверхностных состояний и при этом происходит смещение точки инверсии проводимости в приграничной области.

4. Заключение

Исследование изменений вольт-фарадных характеристик МДП структур в процессе воздействия на них сверхкоротных импульсов (СКИ) электромагнитного излучения показывает, что:

- величина возрастания емкости диэлектрика в МДП структурах зависит от энергии СКИ;
- при воздействии СКИ с энергией порядка 10^{-5} Дж энергетическая плотность поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик увеличивается на порядок;
- при увеличении энергии СКИ до 10^{-4} Дж возможен сквозной пробой диэлектрика в МДП структурах.

Список литературы

- [1] С.Н. Рукин. ПТЭ, № 4, 5 (1999).
- [2] А.С. Карауш, Р.В. Потемкин. Электрон. пром-сть, № 1, 93 (1998).
- [3] В.Г. Шпак, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов и др. Докл. РАН, № 1, 50 (1999).
- [4] *Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник*, под ред. А.В. Ржанова (М., Наука, 1976).
- [5] Б.А. Стрюков. РЭ, № 7, 887 (2000).
- [6] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова. Письма ЖТФ, **25** (1), 42 (1999).
- [7] Д.А. Усанов, С.Б. Вениг, В.Е. Орлов. Письма ЖТФ, **25** (2), 39 (1999).
- [8] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова и др. ФТП, **34** (5), 567 (2000).
- [9] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Н.В. Угрюмова. ФТП, **32** (11), 1399 (1998).
- [10] А.А. Беляев, А.Е. Беляев, А.А. Ермолович и др. ЖТФ, **68** (12), 49 (1998).
- [11] В.В. Антипин, В.А. Годовицын, Д.В. Громов, А.С. Кожевников, А.А. Раваев. Зарубеж. электрон. техн., № 1, 37 (1995).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [13] Е.Н. Бормонтов. *Физика и метрология МДП структур* (Воронеж, ВГУ, 1997).
- [14] Е.Н. Nicollian, A. Goetzberger. Bell Syst. Techn. J., **46** (5), 1055 (1967).
- [15] E.N. Bormontov, S.V. Lukin. *Proc. 5th Conf. on Simulation of Devices Technologies* (Obninsk, Russia, 1996) p. 35.
- [16] В.А. Терехов, Е.А. Тутов, А.Н. Манько, Э.П. Домашевская. Конд. среды и межфазн. границы, **3** (1), 86 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

The influence of ultrashort pulses of electromagnetic radiation on parameters of the metal-dielectric-semiconductor structures

V.A. Terekhov, A.N. Man'ko, E.N. Bormontov, V.N. Levchenko, S.Yu. Trebunskikh, E.A. Tutov, E.P. Domashevskaya

The State University of Voronezh,
394006 Voronezh, Russia