

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИНЖЕКЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА МДП-ПРИБОРОВ

Г.Г. Бондаренко¹, А.А. Столяров²,
Д.С. Васютин², А.М. Михальков², В.В. Андреев²,

¹ *Московский государственный институт электроники и математики*

² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Калужский филиал*

E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru; andreev@bmstu-kaluga.ru

In the present paper influence of conditions of a high-field electron injection on modification of a metal-oxide-semiconductor (MOS) transistor with thermal silicon dioxide film passivated by phospho-silicate glass (PSG), including electron traps is studied. It is shown, that the mode of electron injection from a silicon wafer is more preferable for injection modification of MOS transistors. The quantity of peak detrusion of a threshold voltage above in this mode and it is essential more low probability of disruption of a gate insulator in comparison with injection from an aluminium electrode. The amplitude of current impulses of the charge injection in the gate insulator gets out proceeding from the geometrical sizes of the transistor and electrophysical performances of the dielectric film and to be in a margin from 10^{-7} to 10^{-4} A/cm². The made experiments have shown that it is necessary to anneal of MOS-devices at temperatures nearby 200°C for reception of them with high thermofield stability after modification by electron injection.

В работе проведено исследование влияния режимов сильнополевой инжекции электронов на модификацию МДП-транзисторов с многослойным подзатворным диэлектриком SiO₂-ФСС, содержащим электронные ловушки.

В качестве экспериментальных образцов использовались МДП-транзисторы, имевшие длину канала 2 мкм и соотношение длины канала к ширине $2 \cdot 10^4$, а также одновременно с ними изготовленные тестовые МДП-конденсаторы.

Инжекционную модификацию МДП-транзисторов и структур проводили с использованием туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов из кремниевой подложки или алюминиевого электрода, осуществляющуюся в режиме протекания постоянного тока или в режиме поддержания постоянного напряжения на затворе. В процессе модификации часть инжектированных электронов захватывалась на ловушки в пленке ФСС, образуя инжекционно стимулированный отрицательный заряд [1,2]. Величина отрицательного заряда для подзатворного диэлектрика, изготовленного в одном технологическом процессе, почти не зависела от режимов инжекции и в основном определялась плотностью инжектированного заряда [1-4]. Термополевая стабильность отрицательного заряда, захватывающегося в пленке ФСС при модификации параметров МДП-приборов, имеет первостепенное значение, поскольку определяет надежность и долговечность работы приборов. Как было показано в [1] при сильнополевой туннельной инжекции электронов в МДП-структурах Si-SiO₂-ФСС-A1 накапливаемый отрицательный заряд состоит из двух компонент. Первая компонента обладает низкой термополевой стабильностью и практически полностью стекает при отжиге 200 °С. Вторая термостабильная компонента заряда начинает релаксировать лишь при более высоких

температурах. Следовательно для получения приборов с высокой термополевой стабильностью после инъекционной модификации их отжигали при температуре 200° С в течение 1 часа.

В результате удалось установить, что использование в качестве подзатворного диэлектрика SiO₂-ФСС с плёнкой ФСС толщиной около 20 нм, полученной диффузией фосфора в термическую пленку SiO₂, и концентрацией фосфора 1 % даёт возможность с помощью сильнополевой туннельной инъекции электронов по Фаулеру-Нордгейму корректировать пороговое напряжение МДП-транзистора непосредственно на готовых приборах в диапазоне от 3,2 В до 0,1 В. Корректировка порогового напряжения производится за счёт накопления в объеме подзатворного диэлектрика требуемой плотности термостабильной компоненты отрицательного заряда.

На рис. 1 показаны зависимости порогового напряжения МДП-транзисторов от времени инъекции для различных значений положительного напряжения, прикладываемого к затвору. Во время инъекции подложка транзистора заземлялась. Приложение к затвору МДП-транзистора постоянного напряжения положительной полярности вызывало сильнополевую туннельную инъекцию электронов из кремниевой подложки. Измерение ВАХ на МДП-структурах, изготовленных совместно с исследуемыми МДП-транзисторами, показало, что при данных напряжениях через подзатворный диэлектрик протекает инъекционный ток плотностью $10^{-6} - 10^{-5}$ А/см².

Как видно из рис. 1, сдвиг порогового напряжения МДП-транзисторов при инъекционной модификации имеет полевую зависимость, возрастающую с увеличением приложенного напряжения. Данный результат хорошо согласуется с ранее полученными экспериментальными данными, характеризующими накопление отрицательного заряда в подзатворных диэлектриках МДП-структур с термической пленкой SiO₂, пассивированной пленкой ФСС [1-4]. Как было показано в [1], плотность отрицательного заряда пропорциональна плотности заряда инжектированных электронов и, следовательно, с повышением напряжения на затворе МДП-транзистора возрастает плотность туннельного тока и за единицу времени инжектируется больший заряд.

На рис. 2 приведены зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой туннельной инъекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инъекции. Для реализации режима сильнополевой инъекции электронов из кремниевой подложки к затвору МДП-транзистора прикладывалось положительное напряжение 73 В. Кривая 2 на рис. 2 характеризует термостабильную компоненту отрицательного заряда. Как видно из рис. 2, термостабильная компонента отрицательного заряда составляет около 60 % от общей плотности заряда, накопленного в диэлектрике в процессе инъекции.

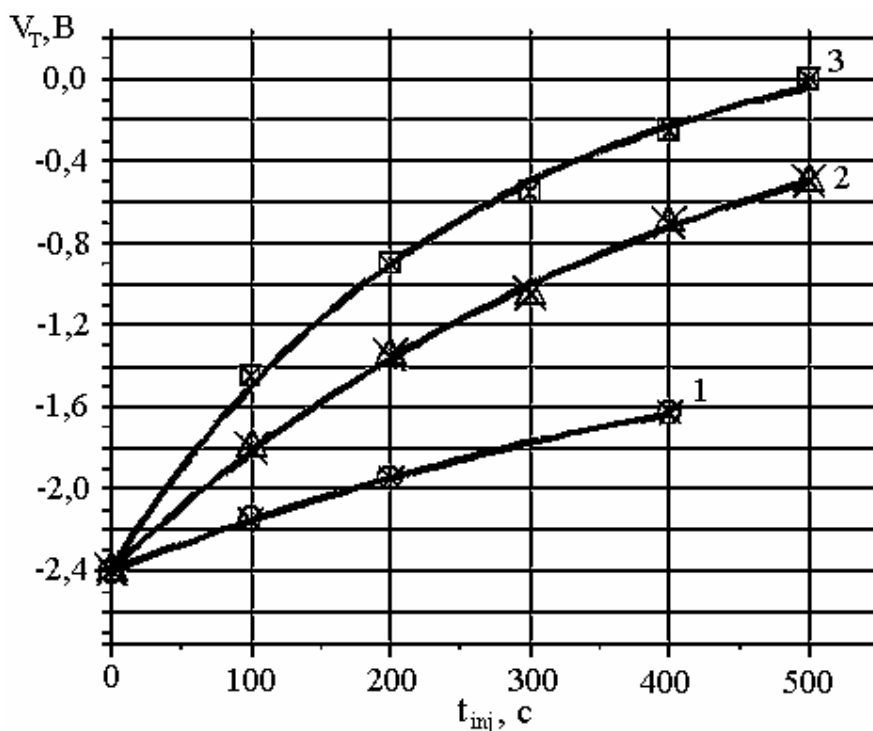


Рис. 1. Зависимости порогового напряжения МДП-транзисторов от времени инжекции для различных значений положительного напряжения, прикладываемого к затвору: 1 – 70 В; 2 – 72 В; 3 – 73 В.

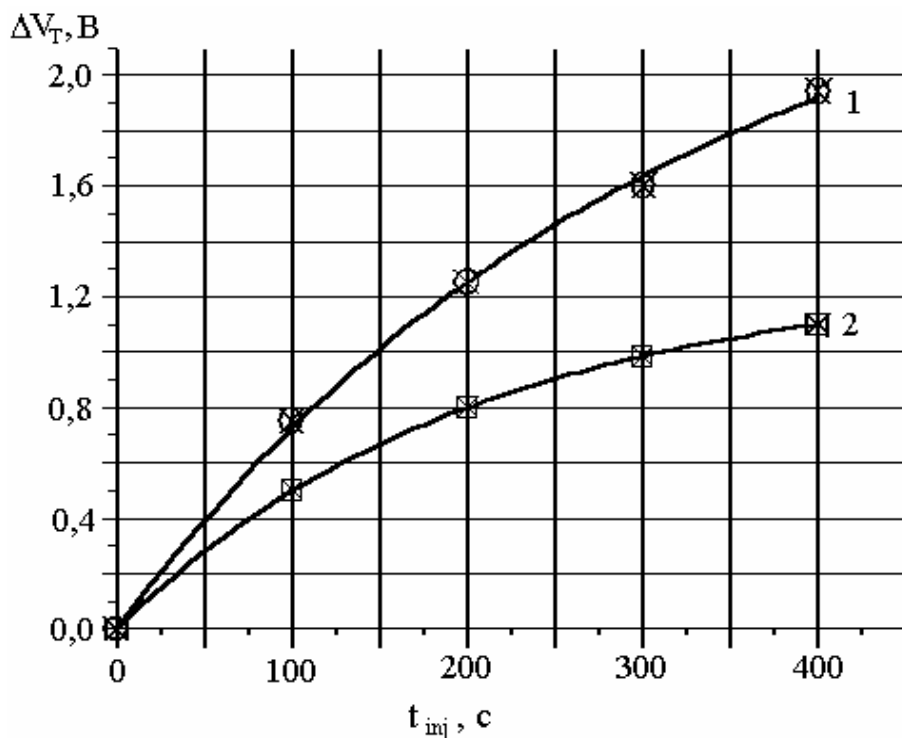


Рис. 2. Зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции.

Для исследования влияния режимов сильнополевой туннельной инжекции в подзатворный диэлектрик МДП-транзисторов модификация осуществлялась также в режиме инжекции электронов из алюминиевого электрода. С этой целью к затвору МДП-транзистора прикладывалось отрицательное напряжение

73 В. На рис. 3 приведены типичные зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой инжекции электронов из алюминиевого электрода (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции.

Установлено, что при инжекции электронов из кремниевой подложки можно сдвигать пороговое напряжение транзистора на величину до 3,5 В, при этом наблюдается заметное в 2 - 3 раза снижение крутизны транзистора. При инжекции электронов из алюминиевого электрода максимальный сдвиг порогового напряжения составлял около 1,5 В без заметного снижения крутизны. После отжига транзисторов сдвиг порогового напряжения составлял около 60% от значений, полученных после инжекции, а крутизна транзистора практически восстанавливалась до своей исходной величины. Таким образом, для инжекционной модификации МДП-транзисторов более предпочтительным оказывается режим инжекции электронов из кремниевой подложки, при котором выше величина максимального сдвига порогового напряжения и существенно ниже вероятность пробоя подзатворного диэлектрика по сравнению с инжекцией из Al-го электрода.

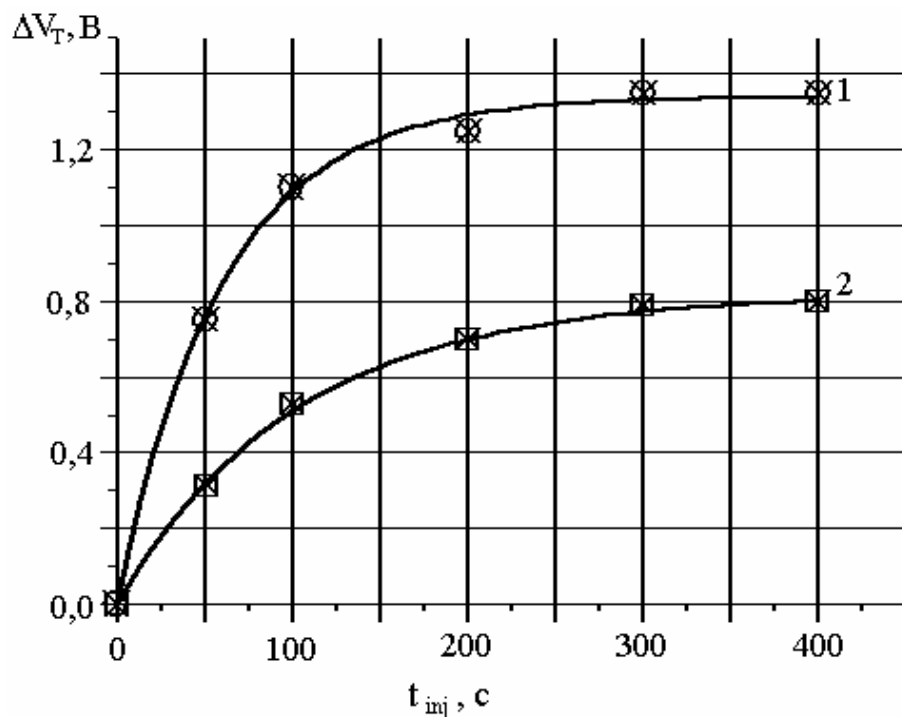


Рис. 3. Зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой инжекции электронов из алюминиевого электрода (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции.

Амплитуда импульсов тока, используемых для инжекции заряда в подзатворный диэлектрик, выбирается, исходя из геометрических размеров транзистора и конкретных электрофизических характеристик диэлектрической пленки, и лежит в диапазоне 10^{-7} - 10^{-4} А/см². При сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик наряду с накоплением отрицательного заряда, используемого для подгонки порогового напряжения

транзистора, может наблюдаться генерация положительного заряда, сопровождающаяся одновременной деградацией границы раздела Si-SiO₂. Плотность положительного заряда, генерируемого сильнополевой инжекцией, экспоненциально возрастает с увеличением электрического поля (плотности тока). При плотностях тока более 10⁻⁴ А/см² в подзатворном диэлектрике начинается значительный рост плотности положительного заряда, который компенсирует отрицательный заряд и значительно снижает эффективность метода [1]. Накопление положительного заряда также приводит к повышению плотности поверхностных состояний и деградации характеристик транзистора, а неоднородное распределение плотности положительного заряда по площади подзатворного диэлектрика может вызвать локальное увеличение плотности инжекционного тока и значительно повышает вероятность пробоя диэлектрика. Таким образом, верхнюю границу плотности тока необходимо ограничить значением 10⁻⁴ А/см². Использование токовых импульсов амплитуды меньше 10⁻⁷ А/см² приводит к очень большим временам подгонки порогового напряжения (более часа) и затруднительно с точки зрения технической реализации. В МДП-транзисторах с малой площадью затвора для обеспечения плотности инжекционного тока в диапазоне 10⁻⁷ - 10⁻⁴ А/см² необходимо обеспечивать очень малые токи затвора 10⁻¹⁵ - 10⁻¹² А, что вызывает значительные технические трудности. В этом случае целесообразней использовать режим инжекции электронов при постоянном напряжении на затворе, при этом электрические поля создаваемые в подзатворном диэлектрике должны обеспечивать протекание инжекционных токов в диапазоне 10⁻⁷ - 10⁻⁴ А/см².

1. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V.427. P.377-380.
2. Электронный захват в МДП-структурах с термическим оксидом кремния при туннельной инжекции// В.С. Солдатов, Н.В. Соболев, И.Б. Варлашов и др. / Изв. вузов. Физика. 1989. № 12. С.82-84.
3. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции// Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.
4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films. 2006 V.515. 670-673.