

Метод увеличения подвижности носителей заряда в канале полевого 4H-SiC-транзистора

© А.И. Михайлов⁺, А.В. Афанасьев⁺, В.А. Ильин⁺, В.В. Лучинин⁺,
С.А. Решанов*, А. Schöpler*

⁺ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

* Ascatron AB,
16440 Kista, Sweden

E-mail: m.aleksey.spb@gmail.com

(Получена 3 декабря 2015 г. Принята к печати 8 декабря 2015 г.)

Предложен новый метод увеличения подвижности носителей заряда в канале полевого транзистора на карбиде кремния политипа 4H при помощи окисления двухслойной системы, состоящей из тонкого слоя нитрида кремния и диоксида кремния. Наряду с увеличением подвижности носителей заряда в канале транзистора наблюдается снижение среднего значения поля пробоя по сравнению с подзатворным диэлектриком, выращенным в атмосфере N₂O.

1. Введение

Электрические свойства границы раздела 4H-SiC/SiO₂ являются ключевой проблемой при создании современных полевых силовых транзисторов на карбиде кремния политипа 4H. Формирование подзатворного диэлектрика методом термического окисления в атмосфере сухого кислорода неизменно приводит к высокой плотности состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂, связанных с кластерами углерода и так называемыми околоинтерфейсными ловушками [1]. Высокая плотность состояний, энергетически расположенных вблизи дна зоны проводимости карбида кремния, обуславливает снижение подвижности носителей заряда в канале транзистора и ухудшение рабочих характеристик прибора в целом. Наиболее широко распространенные методы пассивации поверхностных состояний — это рост подзатворного диэлектрика или отжиг выращенного методом сухого термического окисления подзатворного диэлектрика в азотсодержащей атмосфере (NO, N₂O) [2,3]. Установлено, что атомы азота диффундируют через слой диоксида кремния и образуют химические связи с атомами углерода на границе, ответственными за возникновение электронных состояний в запрещенной зоне карбида кремния, изменяя их энергетическое положение и перемещая данные состояния ближе к середине запрещенной зоны, что делает захват электронов на них менее эффективным [4].

В данной работе мы предлагаем альтернативный способ доставки атомов азота на интерфейс с помощью введения тонкого слоя нитрида кремния на границе раздела 4H-SiC/SiO₂. Для сравнения также был изготовлен подзатворный диэлектрик методом термического окисления в атмосфере N₂O. Свойства подзатворных диэлектриков с пассивированным азотом поверхностными состояниями сравниваются, в свою очередь, со свойствами подзатворного диэлектрика, выращенного в атмосфере сухого кислорода.

2. Методика эксперимента

Для формирования тестовых структур использовались коммерческие подложки n⁺-4H-SiC с эпитаксиальным слоем p-типа проводимости толщиной 5 мкм с концентрацией алюминия $(7-10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, выращенным на 4°-разориентированной Si-границе (0001). Было изготовлено три различных типа подзатворного диэлектрика: методом термического окисления в атмосфере N₂O при 1250°C (образец #2), методом термического окисления в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C (образец #3) и нанесением двухслойной системы (5 нм нитрида кремния)/(45 нм диоксида кремния) методом плазмохимического газофазного осаждения (PECVD) с последующим окислением в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C в течение 1 ч (образец #1). В ходе этапа окисления атомы кислорода диффундируют через слой диоксида кремния и окисляют тонкий слой нитрида кремния, а затем тонкий приповерхностный слой карбида кремния. Атомы азота, освобожденные в результате реакции окисления тонкого слоя нитрида кремния, доступны для пассивации поверхностных состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂. Параметры всех трех процессов формирования подзатворного диэлектрика подбирали исходя из необходимой толщины, равной 50 нм.

Были изготовлены МОП структуры (металл-оксид-полупроводник) с инверсионным каналом диаметром 150 мкм и полевые планарные транзисторы с шириной и длиной канала 40 и 250 мкм соответственно. МОП структуры с инверсионным каналом представляют собой радиальные структуры с имплантированным n⁺-кольцом вдоль края контакта в качестве источника электронов. Такие структуры позволяют электрически характеризовать подзатворные диэлектрики в режиме инверсии [5].

Омические контакты были сформированы при помощи имплантации созданием n⁺-областей в SiC, напылением

Параметры транзисторов

Образец	d , нм	S , В/дек	V_{th} , В	μ_{FE} , $\text{cm}^2/\text{B} \cdot \text{c}$ ($V_{gs} = 25 \text{ В}$)	$\langle E_b \rangle$, МВ/см
# 1	49.5	0.38	5.5	19.7	9.2
# 2	49.1	0.16	4.7	13.7	9.9
# 3	55.6	1.5	12.4	3.6	10.4

Ni и последующим быстрым отжигом при 950°C. Контакт к диэлектрику был изготовлен по стандартной для МОП транзисторов технологии в виде двухслойной системы поликремний (500 нм)/TiW (100 нм). Контактные площадки были сформированы методом сухого травления через фоторезистивную маску.

Для исследования электрофизических свойств образцов были проведены вольт-фарадные и вольт-амперные измерения МОП структур с инверсионным каналом при комнатной температуре и вольт-амперные измерения планарных полевых транзисторов при комнатной температуре и при 200°C.

Толщина подзатворного диэлектрика d (см. таблицу) определялась при помощи метода вольт-фарадных измерений из максимального значения емкости МОП структуры в режиме аккумуляции.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ), $I_{ds}(V_{gs})$, снятые при комнатной температуре, представлены на рис. 1. Полевой транзистор с подзатворным диэлектриком, выращенным в сухом кислороде, имеет самый низкий ток стока I_{ds} и низкую полевую подвижность носителей заряда, что обусловлено высокой плотностью поверхностных состояний. Образцы #1 и #2 с внедренным на интерфейс азотом имеют схожие ВАХ, однако образец #1 имеет более высокий ток стока I_{ds} при высоких значениях V_{gs} напряжения на затворе. Из передаточных

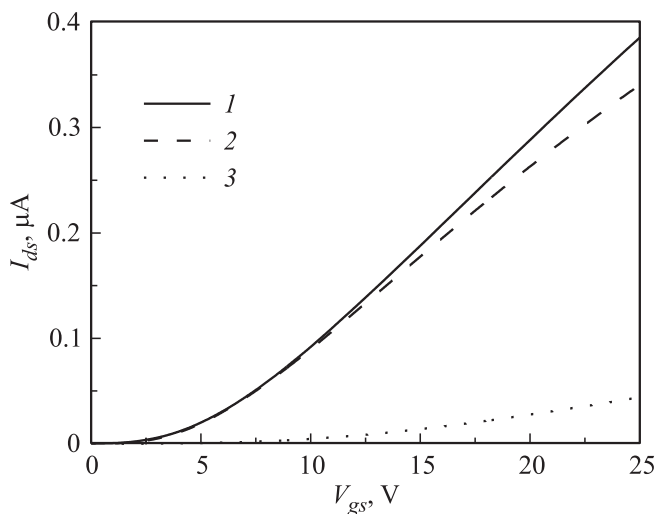


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики планарных полевых транзисторов при комнатной температуре и $V_{ds} = 0.1 \text{ В}$: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3.

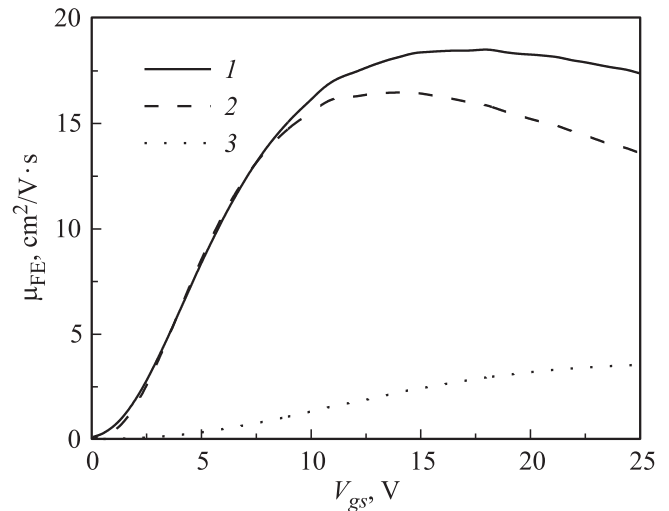


Рис. 2. Полевая подвижность носителей заряда, полученная из вольт-амперных характеристик планарных полевых транзисторов при комнатной температуре: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3.

характеристик (рис. 1), снятых при комнатной температуре и построенных в полулогарифмическом масштабе, была рассчитана крутизна ВАХ S для всех образцов (см. таблицу). Крутизна передаточных характеристик полевых транзисторов является удобным параметром для сравнения их характеристик и напрямую связана с плотностью поверхностных состояний [6]. Как и ожидалось, образец #3, полученный методом сухого окисления карбида кремния, имеет наименьшую величину крутизны ВАХ, а значит, и самую высокую плотность поверхностных состояний. Высокая плотность состояний приводит к более высокому напряжению включения транзистора V_{th} , вычисленного из пересечения прямой, аппроксимирующей линейный участок ВАХ, и оси абсцисс (см. таблицу). Плотность поверхностных состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂ для образца #1 выше, чем для образца #2, полученного методом термического окисления в атмосфере N₂O. В то же самое время образец #1 имеет более высокую подвижность носителей заряда μ_{FE} в области высоких напряжений на затворе (рис. 2), где подвижность ограничена рассеянием носителей заряда на шероховатостях поверхности [7]. Это свидетельствует о более низкой шероховатости поверхности для процесса, по которому был изготовлен образец #1. По всей видимости, это вызвано тем, что термическое окисление карбида кремния приводит к увеличению шероховатости границы 4H-SiC/SiO₂, а при формировании подзатворного диэлектрика методом доокисления двухслойной системы „нитрид кремния–оксид кремния“ окисляется лишь тонкий слой SiC.

Типичные управляющие напряжения затвора современных полевых транзисторов на карбиде кремния лежат в диапазоне $V_{gs} = (-10) - (+25) \text{ В}$. Значения полевой подвижности носителей заряда μ_{FE} при $V_{gs} = 25 \text{ В}$

приведены в таблице. Так, образец #1 имеет более высокое значение полевой подвижности носителей заряда по сравнению с образцом #2, несмотря на более высокую плотность поверхностных состояний.

По сравнению с кремниевыми силовыми приборами устройства на основе карбида кремния способны функционировать при гораздо более высоких температурах без ухудшения эксплуатационных качеств благодаря широкозонности 4H-SiC. Высокотемпературные вольт-амперные характеристики (рис. 3) имеют тот же характер, что и при комнатной температуре, а больший ток стока обусловлен меньшим количеством носителей заряда, захваченных на интерфейсные ловушки. Значительное увеличение тока стока для образца #3 вызвано именно высокой плотностью поверхностных

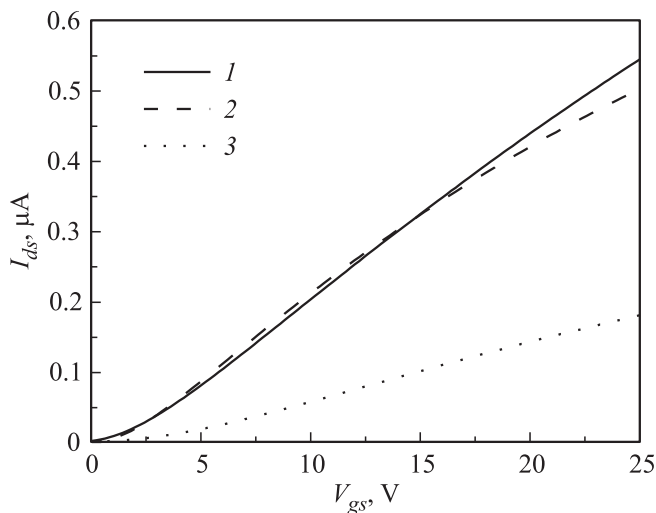


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики планарных полевых транзисторов при 200°C и $V_{ds} = 0.1$ В: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3.

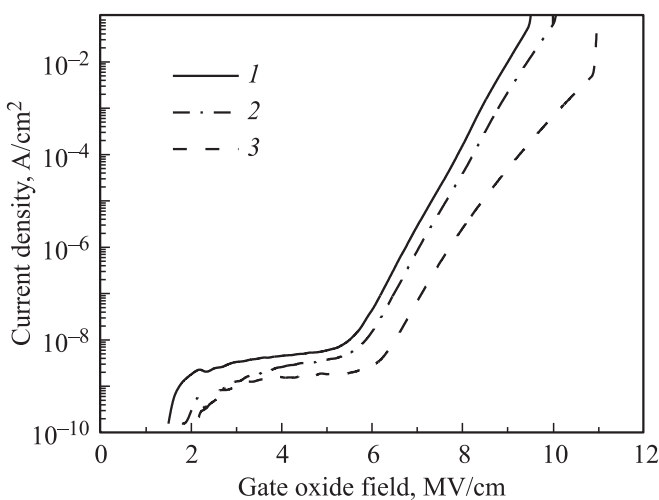


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики МОП структур с инверсионным каналом при комнатной температуре: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3.

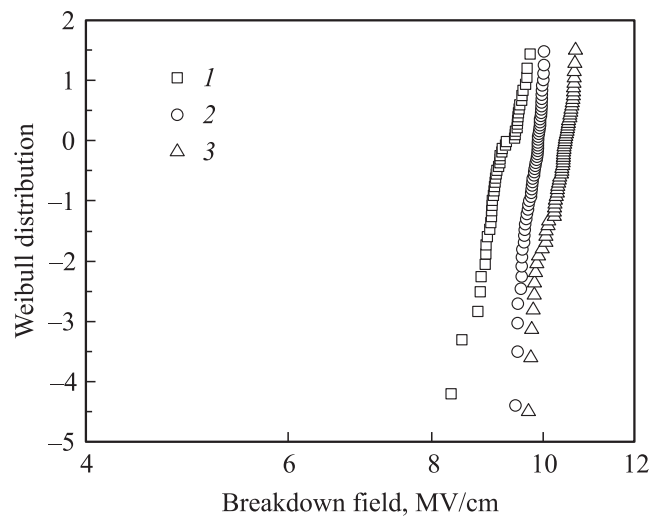


Рис. 5. Функция распределения Вейбулла для электрического пробоя подзатворного диэлектрика: 1 — образец #1, 2 — образец #2, 3 — образец #3.

состояний на границе раздела карбид кремния/диоксид кремния.

Вольт-амперные характеристики МОП структур с инверсионным каналом были сняты при комнатной температуре, за ток пробоя принят ток плотностью 0.1 А/см² (рис. 4). На всех кривых, построенных в полулогарифмическом масштабе, можно выделить два линейных участка с изменением угла наклона в районе 6 МВ/см. Протекание тока через подзатворный диэлектрик в области до 6 МВ/см обусловлено механизмом Пула–Френкеля, а изменение наклона прямой при превышении напряженности поля 6 МВ/см — включением механизма автоэлектронной эмиссии по Фаулеру–Нордгейму.

Вольт-амперные кривые для образцов с внедренным на интерфейс азотом имеют схожий характер, но при этом более низкое среднее значение поля диэлектрического пробоя (E_b) по сравнению с подзатворным диэлектриком, полученным методом сухого термического окисления (см. таблицу).

Измерение пробойного напряжения подзатворного диэлектрика осуществлялось методом TZDB (time zero dielectric breakdown) с последующим построением функции распределения Вейбулла, которая представлена на рис. 5. Наблюдается незначительное ухудшение электрической прочности подзатворного диэлектрика при внедрении в него атомов азота. Для всех образцов характерен внутренний тип пробоя, поскольку не наблюдается ярко выраженных изломов на функции распределения Вейбулла. Деграция пробойных характеристик диоксида кремния, вероятно, связана с присутствием атомов азота в диэлектрике и на границе раздела, а для образца #1 еще и с более низкой надежностью осажденного методом PECVD слоя SiO₂ по сравнению с термически выращенным диоксидом кремния.

3. Заключение

Представлен и исследован новый метод формирования подзатворного диэлектрика для полевых транзисторов на карбиде кремния политипа 4H при помощи окисления тонкого слоя нитрида кремния. По сравнению с термическим окислением в атмосфере N₂O, изготовление подзатворного диэлектрика предложенным методом увеличивает подвижность носителей заряда в канале транзистора на 44% за счет более низкой шероховатости границы раздела 4H-SiC/SiO₂. К недостаткам данного метода можно отнести более высокую плотность состояний на границе, ведущую к более высокому напряжению включения транзистора и снижению среднего пробойного напряжения подзатворного диэлектрика (в среднем на 12%) по сравнению с термическим окислением в атмосфере N₂O. Вариантом дальнейшего развития данного метода является применение метода ALD (atomic layer deposition) для нанесения двухслойной системы Si₃N₄/SiO₂, что обеспечило бы лучший контроль толщины осаждаемых слоев и более высокую электрическую прочность подзатворного диэлектрика.

Список литературы

- [1] R. Schörner, P. Friedrichs, D. Peters, D. Stephani. IEEE Electron. Device Lett., **20**, 241 (1999).
- [2] Ph. Jamet, S. Dimitrijevic, Ph. Tanner. J. Appl. Phys., **90**, 5058 (2001).
- [3] G.Y. Chung, C.C. Tin, J.R. Williams, K. McDonald, M. Di Ventra, S.T. Pantelides, L.C. Feldman, R.A. Weller. Appl. Phys. Lett., **76**, 1713 (2000).
- [4] M. Krieger, S. Beljakowa, L. Trapaidze, T. Frank, H.B. Weber, G. Pensl, N. Hatta, M. Abe, H. Nagasawa, A. Schöner. Phys. Status Solidi B, **245** (7), 1390 (2008).
- [5] A.I. Mikhailov, A.V. Afanasyev, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, A. Schöner, L. Knoll, R.A. Minamisawa, G. Alfieri, H. Bartolf. Mater. Sci. Forum, **821-823**, 480 (2015).
- [6] D.K. Schroder. *Semiconductor material and device characterization* (John Wiley & Sons, 2006).
- [7] S. Potbhare, N. Goldsman, A. Lelis, J.M. McGarrity, F.B. McLean, D. Habersat. IEEE Trans. Electron Dev., **55**, 2029 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Method for electron mobility enhancement in 4H-SiC MOSFET channel

A.I. Mikhailov⁺, A.V. Afanasyev⁺, V.A. Ilyin⁺, V.V. Luchinin⁺, S.A. Reshanov*, A. Schöner*

⁺ Saint-Petersburg State Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia
* Ascatron AB,
16440 Kista, Sweden

Abstract Novel method for increasing electron mobility in the 4H-SiC MOSFET channel by oxidation of bilayer system consisting of a thin silicon nitride layer and a silicon dioxide layer. In addition to the channel mobility increase, insignificant degradation of the average dielectric breakdown field was observed as compared to thermally grown gate oxide in N₂O ambience.