

Вольт-фарадные характеристики МДП структур (Al/Ti)/Al₂O₃/n-GaN

© П.А. Иванов[†], А.С. Потапов⁺, А.Е. Николаев⁺⁺, В.В. Лундин⁺⁺, А.В. Сахаров⁺⁺,
А.Ф. Цацунников⁺⁺, А.В. Афанасьев[≠], А.А. Романов[≠], Е.В. Осачев[≠]

[†] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[≠] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 февраля 2015 г. Принята к печати 10 февраля 2015 г.)

Измерены и проанализированы вольт-фарадные характеристики МДП структур (Al/Ti)/Al₂O₃/n-GaN. Пленки GaN *n*-типа проводимости выращены на сапфировых подложках с ориентацией (0001) методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Оксид алюминия толщиной 60 нм нанесен на поверхность GaN методом атомно-слоевого осаждения из газовой фазы. Металлические контакты напылены электронно-лучевым испарением титана и алюминия в вакууме. По данным измерений напряженность поля пробоя оксида, относительная диэлектрическая проницаемость оксида и интегральная плотность электронных состояний на границе раздела оксид–полупроводник составляют $5 \cdot 10^6$ В/см, 7,5 и $3 \cdot 10^{12}$ см⁻² соответственно.

1. Введение

В последнее время гетероструктурные полевые транзисторы на основе AlGaIn/GaN привлекают все больше внимания разработчиков электронной компонентной базы. При потенциально высоких характеристиках затраты на изготовление транзисторов в системе AlGaIn/GaN могут быть относительно невелики благодаря возможности гетероэпитаксиального роста нитрида галлия на инородных подложках большого диаметра, в частности кремниевых. Кроме СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN интенсивно разрабатываются высоковольтные ключевые транзисторы, которые рассматриваются как альтернатива кремниевым силовым МОП (металл–оксид–полупроводник) транзисторам.

Ключевые транзисторы, применяемые в силовых импульсных преобразователях, работают, как правило, в нормально закрытом режиме. Это дает возможность упростить схемы драйверов и уменьшить энергетические потери при коммутациях. Один из перспективных вариантов конструкции нормально закрытых высоковольтных транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN [1,2] показан на рис. 1. В таком транзисторе проводящий канал возникает в слое нелегированного GaN (на поверхности протравленной канавки) при подаче на МДП затвор (структура металл–диэлектрик–полупроводник), открывающего потенциала. В пассивных областях между истоком и затвором, затвором и стоком ток поддерживается двумерным электронным газом с высокой подвижностью электронов.

Важнейшим конструктивным элементом транзистора является МДП затвор, который должен обеспечивать нормально закрытый режим работы (положительное пороговое напряжение), высокую крутизну подпороговой характеристики, большое напряжение пробоя сток–затвор. По причине отсутствия в случае III-нитридов

стабильного собственного оксида для создания полевых транзисторов на их основе интенсивно разрабатываются МДП структуры с нанесенными (инородными) диэлектрическими слоями. При этом наибольший интерес представляют диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k* диэлектрики) — Al₂O₃, HfO₂ и др. [3]. Высокая диэлектрическая проницаемость подзатворного оксида позволяет увеличить его толщину с сохранением высокой крутизны транзистора, а более толстый диэлектрик обеспечивает снижение токов утечки и увеличение напряжения пробоя. Кроме того, *high-k* диэлектрики могут служить в качестве эффективного пассивирующего покрытия поверхности AlGaIn.

В настоящей работе изготовлены МДП структуры (Al/Ti)/Al₂O₃/n-GaN с целью определения перспектив их использования в качестве затвора МДП транзисторов. Для этого изучались их зарядовые свойства путем измерений и анализа вольт-фарадных характеристик.

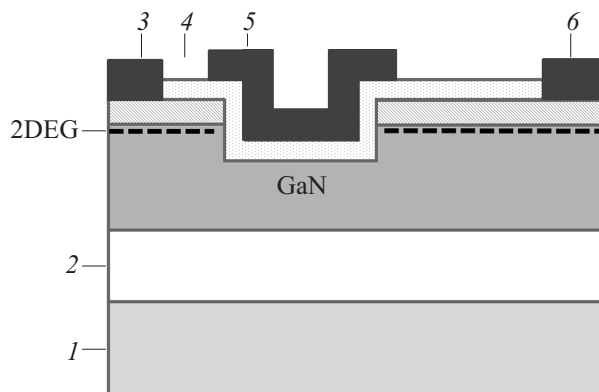


Рис. 1. Поперечное сечение нормально закрытого силового транзистора на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN [1,2]. 1 — подложка, 2 — буферный слой, 3 — исток, 4 — подзатворный диэлектрик, 5 — затвор, 6 — сток.

[†] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

2. Экспериментальные образцы

Пленки GaN *n*-типа проводимости выращивались на сапфировых подложках с ориентацией (0001) методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) при давлении 400 мбар [4]. Вначале выращивался буферный слой, на котором затем был выращен слой со ступенчатым профилем легирования кремнием: 0,1 мкм — $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 0,2 мкм — $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 0,4 мкм — $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В промежутках процесс прерывался для удаления избыточной концентрации силана из реактора.

Слой Al_2O_3 толщиной 60 нм осаждался методом атомно-слоевого осаждения из газовой фазы (atomic layer deposition, ALD) [5]. Метод ALD представляет собой последовательность циклически чередующихся реакций в хемосорбированных слоях и обеспечивает точный контроль состава и толщины осаждаемых слоев. После осаждения слоя Al_2O_3 на поверхность GaN дополнительная термообработка не проводилась.

Емкостные металлические контакты формировались последовательным электронно-лучевым испарением титана (100 нм) и алюминия (100 нм) в вакууме. Конфигурация контактов показана на вставке к рис. 2. Площадь внутреннего контакта ($S_b = 6.6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$) много меньше площади наружного контакта, так что измеряемая емкость фактически равна емкости внутреннего контакта. Зарядовые свойства МДП структур изучались путем анализа их вольт-фарядных ($C-V$) характеристик. Для измерений использовался цифровой LCR-измеритель E7-12, работающий по параллельной схеме замещения измеряемого импеданса (частота сигнала 1 МГц). В процессе измерений напряжение на структуре изменялось с переменным шагом (0,5 и 1 В) в диапазоне от +10

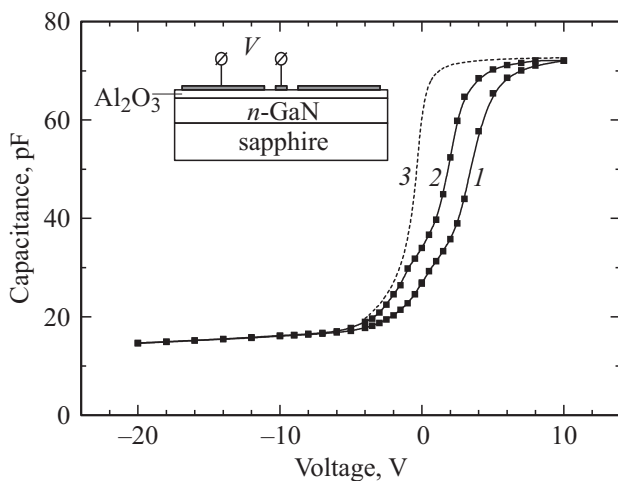


Рис. 2. $C-V$ -характеристики, измеренные при изменении напряжения от положительных значений к отрицательным (1) и обратно (2). 3 — характеристика „идеальной“ МДП структуры, рассчитанная при $C_d = 72 \text{ пФ}$, $N = 5.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На вставке — конфигурация емкостных контактов.

до -20 В . Перед каждым измерением структуры выдерживались под напряжением в течение 1 мин.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Измеренные $C-V$ -характеристики МДП структур (рис. 2) показывают глубокую модуляцию емкости C постоянным напряжением.

При положительных напряжениях (режим аккумуляции электронов) емкость МДП структуры насыщается: она равна емкости диэлектрического слоя, $C_d = 72 \text{ пФ}$. При толщине оксида $d = 60 \text{ нм}$ рассчитанная диэлектрическая проницаемость оксида составляет 7.5. В режиме аккумуляции электрический пробой структур происходил при напряжениях около +30 В. Поскольку в режиме аккумуляции все напряжение, приложенное к затвору, падает на диэлектрическом слое, по величине напряжения пробоя (V_b) можно вычислить напряженность поля пробоя оксида: $E_b = V_b/d = 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$.

В процессе измерений был обнаружен гистерезис $C-V$ -характеристик при изменениях напряжения от положительных значений к отрицательным и обратно. Причиной наблюдаемого гистерезиса может быть неравновесное заполнение „медленных“ поверхностных состояний (ПС), которые обмениваются электронами с полупроводником. В режиме аккумуляции (положительное напряжение на структуре) эти ПС заполнены электронами. При изменении напряжения от положительных значений к отрицательным (кривая 1 на рис. 2) „медленные“ ПС остаются вначале в состоянии неравновесного заполнения электронами, создавая на границе раздела неравновесный отрицательный заряд. Затем при достаточно больших отрицательных напряжениях происходит возврат к равновесному зарядовому состоянию (за счет термополевой и полевой эмиссии электронов с уровней этих ПС в зону проводимости GaN). При обратном проходе от отрицательных значений напряжения к положительным (кривая 2 на рис. 2) неравновесного отрицательного заряда уже нет, так что кривая 2 оказывается смещенной по отношению к кривой 1 в сторону меньших напряжений.

При комнатной температуре $C-V$ -характеристика МДП структуры на основе такого широкозонного полупроводника, как GaN, является неравновесной по отношению к образованию поверхностного инверсионного *p*-слоя (вследствие очень малой скорости термической генерации дырок при комнатной температуре). В этом случае при достаточно больших отрицательных напряжениях форма $C-V$ -характеристики определяется неравновесным расширением области пространственного заряда (ОПЗ) в пленку *n*-GaN. На рис. 3 показана зависимость $C^{-2}(V)$, на которой можно видеть участки с разным наклоном, отвечающие ступенчатому профилю легирования *n*-GaN.

На рис. 2 пунктирной линией 3 показана вольт-фарядная характеристика „идеальной“ МДП структу-

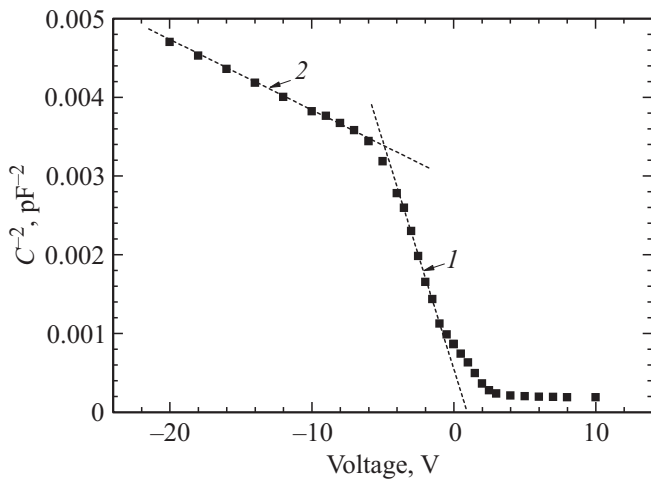


Рис. 3. Зависимость $C^2(V)$, измеренная при изменении напряжения от отрицательных значений к положительным: участок 1 — 0.27 мкм , $N = 5.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, участок 2 — $N = 3.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

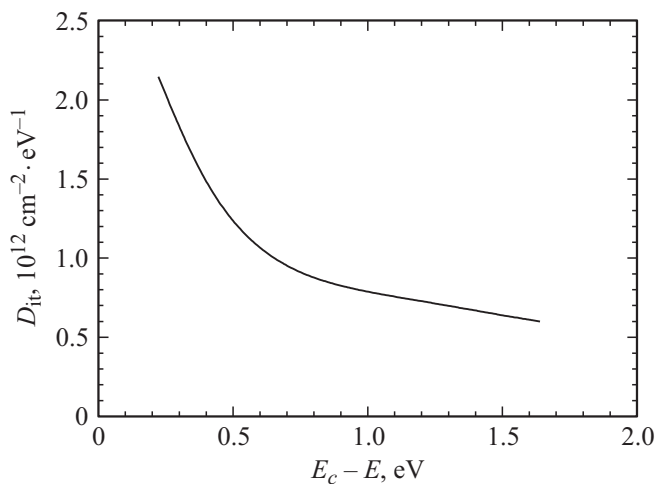


Рис. 4. Энергетическое распределение плотности ПС в запрещенной зоне GaN, определенное методом Термана [7].

ры [6], рассчитанная при $C_d = 72 \text{ пФ}$ и уровне легирования $N = 5.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Как видно из сравнения кривых 3 и 2, напряжение „плоских зон“ составляет +2В. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе на границе раздела есть отрицательный заряд, вызывающий обеднение в полупроводнике. Данный заряд обусловлен равновесным заполнением „быстрых“ ПС. По мере увеличения отрицательного напряжения (т. е. по мере увеличения абсолютной величины поверхностного потенциала) происходит термическая ионизация „быстрых“ ПС, захваченный на них отрицательный заряд нейтрализуется, так что экспериментальная и теоретическая характеристики сближаются.

Цель последующего анализа — определить энергетическое распределение плотности „быстрых“ ПС в запрещенной зоне GaN. При небольших обедняющих напряжениях измеренные $C-V$ -характеристики могут считать-

ся высокочастотными (ВЧ) по отношению к скорости перезарядки „быстрых“ ПС. ВЧ емкость МДП конденсатора является „мерой“ поверхностного потенциала, так что энергетическое распределение плотности ПС можно определить путем сравнения теоретической $C-V^*$ -характеристики идеализированного МДП конденсатора с измеренной ВЧ $C-V$ -характеристикой (V^* и V — напряжения, соответствующие одной и той же емкости C). Согласно методу Термана [7], энергетическую плотность ПС D_{it} (зависимость D_{it} от поверхностного потенциала ψ_s) можно определить следующим образом:

$$qD_{it}(\psi_s)S = C_d \left(\frac{dV}{d\psi_s} - 1 \right) - C_s(\psi_s), \quad (1)$$

где $C_s(\psi_s)$ — емкость ОПЗ полупроводника. Если принять во внимание, что

$$C_d \left(\frac{dV^*}{d\psi_s} - 1 \right) - C_s(\psi_s) = 0, \quad (2)$$

то тогда выражение (1) преобразуется к более простому и удобному для анализа виду:

$$qD_{it}(\psi_s)S = C_d \frac{d(V^* - V)}{d\psi_s} \equiv C_d \frac{d(\Delta V)}{d\psi_s}. \quad (3)$$

На практике выражение (3) было использовано следующим образом. Для ряда значений ψ_s численными методами вычислялись соответствующие значения V^* и C по теории идеальной МДП структуры [6]. Затем строилась зависимость $\Delta V(\psi_s)$. Значения производной $d(\Delta V)/d\psi_s$ определялись численным дифференцированием. Далее от зависимости $D_{it}(\psi_s)$ можно легко перейти к энергетическому распределению плотности ПС $D_{it}(\Delta E_t)$, сопоставив каждому значению ψ_s энергию $\Delta E_t = q|\psi_s| + \Delta E_F$, где $\Delta E_F = 0.15 \text{ эВ}$ — рассчитанное по статистике электронов положение уровня Ферми в нейтральном объеме n -GaN относительно дна зоны проводимости. Распределение плотности состояний, построенное рассмотренным выше способом, показано на рис. 4. Как видно, энергетическая плотность „быстрых“ ПС спадает вглубь запрещенной зоны GaN, достигая минимума ($\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$) в середине запрещенной зоны. Полученное энергетическое распределение плотности ПС является весьма характерным для МДП систем с акцепторными ПС с энергиями в верхней половине запрещенной зоны полупроводника.

4. Заключение

Изготовлены МДП структуры (Al/Ti)/Al₂O₃/n-GaN, в которых подзатворный диэлектрик Al₂O₃ толщиной 60 нм сформирован методом атомно-слоевого осаждения. Напряженность поля пробоя оксида равна $5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$, а его относительная диэлектрическая проницаемость составляет ~ 7.5 . Интегральная плотность поверхностных электронных состояний в структуре не

превышает $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Измеренные параметры МДП структур свидетельствуют о перспективности использования технологии ALD для формирования подзатворного диэлектрика в МДП транзисторах на основе GaN. В дальнейшем необходимо провести исследования, направленные на стабилизацию свойств диэлектрика.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе работа выполнена при поддержке ОЭМПУ РАН (программа „Силовая полупроводниковая электроника на основе кремния, карбида кремния, нитридов галлия и алюминия“). В НТЦ микроэлектроники РАН работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.607.21.0003). В СПбГЭТУ „ЛЭТИ“ работы по атомно-слоевому осаждению Al_2O_3 проведены в рамках плана исследований в созданной совместно с компанией Veneg (Финляндия) лаборатории ALD.

Список литературы

- [1] N. Ikeda, Y. Niiyama, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura, S. Kato, S. Yoshida. Proc. IEEE, **98**, 1151 (2010).
- [2] H. Kambayashi, Y. Satoh, S. Ootomo, T. Kokawa, T. Nomura, S. Kato, T.P. Chow. Sol. St. Electron., **54**, 660 (2010).
- [3] J. Son, V. Chobpattana, B.M. McSkimming, S. Stemmer. Appl. Phys. Lett., **101**, 102 905 (2012).
- [4] W.V. Lundin, A.E. Nikolaev, M.M. Rozhavskaaya, E.E. Zavarin, A.V. Sakharov, S.I. Troshkov, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov. J. Cryst. Growth, **370**, 7 (2013).
- [5] В.В. Лучинин, Е.В. Осачев, А.А. Романов, Э.А. Майоров. Вакуумная техника и технология, **24**, 28 (2014).
- [6] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) т. 1.
- [7] L.M. Termann. Sol. St. Electron., **5**, 285 (1962).

Редактор Л.В. Шаронова

Capacitance–voltage characteristics of (Al/Ti)/ Al_2O_3 /*n*-GaN MIS structures

P.A. Ivanov⁺, A.S. Potapov⁺, A.E. Nikolaev^{+*},
V.V. Lundin^{+*}, A.V. Saharov^{+*}, A.F. Tsatsulnikov^{+*},
A.V. Afanas'ev[≠], A.A. Romanov[≠], E.V. Osachev[≠]

⁺ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} SHM R&E Center, Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

[≠] Saint Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract Capacitance–voltage characteristics of (Al/Ti)/ Al_2O_3 /*n*-GaN MIS structures have been measured and analyzed. GaN epilayers of *n*-type conductivity were grown on sapphire substrates with (0001) orientation by metal–organic chemical vapor deposition method. 60 nm thick layer of Al_2O_3 was deposited on GaN surface by atomic layer deposition method. Metallic contacts were formed by electron beam evaporation of Al and Ti in vacuum. Experimental data showed that the breakdown field, relative dielectric constant and total density of interface states are equal to $5 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$, 7.5 and $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, respectively.