ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23, № 2. С. 127—133.
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-2-127-133

УДК 621.315.592

Оптимизация процесса пассивации при изготовлении СВЧ–транзисторов на основе AlGaIn/GaN гетероструктур методом ICP CVD

© 2020 г. А. А. Слепцова¹, С. В. Черных^{1,2}, Д. А. Подгорный^{1,§}, И. А. Жильников²

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия*

² *АО «НПП «Пульсар»,
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия*

Аннотация. Рассмотрено влияние режимов нанесения пассивирующих диэлектрических пленок нитрида кремния SiN_x методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в индуктивно–связанной плазме (ICP CVD) на параметры транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/GaN. На основании результатов исследования параметров полученных слоев диэлектрического материала определено влияние RF и ICP мощностей, соотношения потоков рабочих газов на скорость роста пленок и их совершенство, а также их влияние на вольт–амперные характеристики пассивируемых HEMT. Скорость осаждения при увеличении RF мощности практически не менялась, однако при увеличении ICP мощности наблюдался ее рост. При этом крутизна транзистора сильно снижалась с ростом RF мощности, ее максимум достигался при минимальной мощности RF = 1 Вт. В начальный момент роста, даже при невысоких значениях RF мощности (уже при 3 Вт), структура транзистора становилась полностью неработоспособной. Показано, что процесс осаждения диэлектрика для пассивации HEMT необходимо начинать при максимально низких значениях RF мощности. Отработан технологический процесс пассивации AlGaIn/GaN СВЧ HEMT, позволяющий осаждать конформные пленки и получать низкие токи сток–исток транзисторов в закрытом состоянии без ухудшения характеристик в открытом состоянии — на уровне не более 15 и 100 мкА соответственно для общей ширины T–образного затвора 1,25 и 5 мм ($U_g = -8$ В и $U_{ds} = 50$ В).

Ключевые слова: нитрид кремния, плазмохимическое осаждение, ICP CVD, AlGaIn/GaN HEMT, пассивация, вольт–амперные характеристики

Введение

На сегодняшний день достигнут значительный прогресс в технологии гетероструктур AlGaIn/GaN и приборов на их основе. В последнее десятилетие началось массовое производство таких приборов. Интерес к данной технологии, прежде всего, связан с уникальными характеристиками материала: высокой подвижностью электронов в двумерном электронном газе (2DEG), высоким значением дрейфовой

скорости насыщения электронов, радиационной и температурной стойкостью и высоким значением критического поля пробоя материала. В числе наиболее широко используемых приборов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN можно выделить СВЧ–транзисторы с высокой подвижностью электронов (*High Electron Mobility Transistor* — HEMT) [1], которые способны работать при высоких значениях рассеиваемой мощности и жестких условиях эксплуатации.

Слепцова Анастасия Алексеевна¹ — аспирант, e-mail: anastasiaa.sleptsova@gmail.com; **Черных Сергей Владимирович**^{1,2} — ассистент (1), начальник лаборатории (2), ORCID 0000-0001-9821-7045, e-mail: chsv_84@mail.ru; **Подгорный Дмитрий Андреевич**^{1,§} — канд. физ.–мат. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой Материаловедения полупроводников и диэлектриков, e-mail: podgorny_d@isis.ru; **Жильников Илья Анатольевич**² — техник, e-mail: Zhilnikov_ia@pulsarnpp.ru

§ Автор для переписки

На современном этапе существует ряд проблем в технологии таких транзисторов, одной из которых является получение низких токов утечки затвора и высоких напряжений пробоя сток–исток [2]. Ток утечки обусловлен несколькими составляющими, такими как обратный ток термоэлектронной эмиссии через барьер Шотки [3], туннельный ток через объемные ловушки (эмиссия Френкеля—Пула) в барьерном слое и ток утечки по поверхности, вызванный поверхностными состояниями [4]. Также одной из принципиальных задач является предотвращение коллапса тока [5]. Это явление связано с захватом носителей заряда ловушками в барьерном слое и на поверхности [6]. В то время как наличие ловушек в барьерном слое можно контролировать при помощи режимов выращивания гетероструктуры [7, 8], плотность поверхностных состояний, из-за которых возникают ловушки на поверхности, может быть уменьшена химической обработкой или пассивацией.

Для обеспечения высокого напряжения пробоя AlGaIn/GaN HEMT обычно увеличивают расстояние затвор–сток, но при этом наблюдается увеличение сопротивления канала в открытом состоянии R_{ON} . Кроме того, для достижения высокого напряжения пробоя можно увеличить толщину буферного слоя и улучшить его качество, однако стоит принять во внимание, что рост толстого буферного слоя приводит к ухудшению качества интерфейса [9]. Также для увеличения напряжения пробоя используют создание полевой платы.

Как было замечено ранее, одним из эффективных методов борьбы с описанными выше проблемами при производстве AlGaIn/GaN HEMT является пассивация поверхности [10]. В качестве пассивирующего слоя для AlGaIn/GaN HEMT применяется широкий спектр относительно новых диэлектрических материалов (Al_2O_3 , HfO_2 и ZrO_2), в основном получаемых методами атомно–слоевого осаждения, а также широко используемых в электронике диэлектрических материалов (SiO_x , SiN_x , SiO_xN_y) [11]. Каждый материал имеет свои преимущества и недостатки, например, SiO_x позволяет получать высокие пробивные напряжения, но слабо влияет на снижение токов утечки [12]. Диэлектрические пленки нитрида кремния SiN_x , в свою очередь, эффективно уменьшают токи утечки. Перспективным вариантом для применения в качестве пассивирующего слоя является оксинитрид кремния SiO_xN_y , так как он сочетает в себе преимущества обоих материалов: и SiO_x и SiN_x [13]. Зачастую используются сочетания пассивирующих покрытий.

Существует множество методов осаждения диэлектрических пленок: PECVD, LPCVD, ICP CVD, ALD и другие [14]. Химическое осаждение из газовой фазы с источником индуктивно–связанной плазмы (*Inductively Coupled Plasma Chemical Vapour*

Deposition, ICP CVD) является усовершенствованным видом традиционного химического газофазного осаждения, стимулированного плазмой (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD*). В процессах PECVD подложка располагается на подогреваемом электроде, который электрически соединен с корпусом камеры. Высокочастотный сигнал (RF мощность) подается к верхнему расположенному параллельно подложке электроду, который оборудован газовым душем для подачи и распределения смеси реакционных газов. В процессах ICP CVD рабочие газы подаются сверху в ICP источник (азот, аммиак или закись азота) и из расположенного вблизи подложкодержателя (стола) газораспределительного кольца (моносилан). Высокочастотный сигнал подается как на стол (RF мощность), так и на катушку, расположенную сверху (ICP мощность) [15]. Значения ICP мощности контролируют диссоциацию молекул рабочих газов и плотность ионов в камере, а значения RF мощности определяют напряжение автосмещения на подложке, т. е. энергию ионов на образце. По сравнению с методом PECVD осаждение пленок методом ICP CVD позволяет получать качественные диэлектрические пленки Si_3N_4 , SiO_2 при низких температурах процесса [16–18]. Также особенностью данного метода является то, что область формирования плазмы отделена от области осаждения пленки, чем достигается минимальное воздействие плазмы на поверхность образца [19]. К тому же возможность изменения параметров режима осаждения в методе ICP CVD позволяет контролировать характеристики и выбирать наиболее оптимальные режимы с целью достижения высокого качества диэлектрических пленок [20]. Основными влияющими на характеристики пленки параметрами осаждения являются RF мощность, ICP мощность, соотношение потоков рабочих газов, рабочее давление, температура осаждения.

Цель работы — выбор оптимального режима получения диэлектрических пленок SiN_x для пассивации диодных меза–структур и T–образных затворов AlGaIn/GaN HEMT, а также создания пассивных элементов монолитных интегральных схем на их основе.

Образцы и методы исследования

Осаждение пленок нитрида кремния проводилось на установке плазмохимического осаждения Oxford Plasmalab 100 при рабочем давлении в камере $P = 10$ мторр и температуре $T = 200$ °C. Остаточное давление в камере перед проведением процесса осаждения составляло не более $3 \cdot 10^{-7}$ торр (1 торр = 133,32 Па). Остальные параметры процесса, такие как соотношение потоков рабочих газов, RF и ICP мощности изменялись в ходе проведения эксперимента.

Осаждение пленок проводили в системе SiH_4/N_2 , в качестве рабочих газов использовали азот N_2 марки ОСЧ 6.0 и моносилан SiH_4 марки ОСЧ 5.0. При исследовании влияния рабочих мощностей на параметры пленок соотношение потоков рабочих газов оставалось постоянным и было равно $\text{SiH}_4/\text{N}_2 = 13,9/13,1$ — при данном соотношении состав пленки близок к стехиометрическому Si_3N_4 (значение показателя преломления равно 2.00). Для изучения влияния соотношения потоков SiH_4 и N_2 на характеристики осаждаемых пленок потоки рабочих газов изменялись в следующих пределах: моносилан — от 10,9 до 16,9 н.см³/мин (н.см³ — нормальный кубический сантиметр), азот — от 16,1 до 10,1 н.см³/мин. Для обеспечения теплообмена между столиком и подложкодержателем подавался гелий (He) под давлением $P = 10$ торр. RF мощность менялась от 1 до 20 Вт с шагом 2 Вт, а ICP мощность варьировалась в пределах от 500 и до 2100 Вт с шагом 200 Вт.

При исследовании того, как изменение параметров режима осаждения влияет на характеристики получаемых диэлектрических пленок, осаждение проводилось на кремниевые подложки. Для исследований зависимости электрических характеристик транзисторов при различных режимах пассивации изготавливали тестовые образцы HEMT (длина затвора 1 мкм, расстояние сток—исток 8 мкм, ширина от 100 до 500 мкм). Схематическое изображение тестовой структуры представлено на рис. 1.

В качестве исходной подложки использовалась гетероструктура $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$, выращенная на подложке сапфира (Al_2O_3) диаметром 75 мм и толщиной 450 мкм. Параметры гетероструктуры были следующие: барьерный слой $\text{Al}_{0,27}\text{Ga}_{0,73}\text{N}$ толщиной 16 нм, промежуточный слой AlIn толщиной 0,7 нм и буферный нелегированный GaIn слой толщиной 2,5 мкм. Слоеое сопротивление, подвижность электронов и слоеая концентрация в двумерном электронном газе измерялись бесконтактным вихретоковым методом и составили 245 Ом/□, 1990 см²/(В·с) и $1,13 \times 10^{13}$ см⁻² соответственно.

На первом этапе изготавливали омические контакты на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$, формирование которой производилось методом электронно—лучевого напыления [21]. После напыления проводился отжиг изготовленных контактов при температуре 850 °С в течение 30 с в атмосфере азота. Перед формированием барьера Шоттки на тестовых образцах была проведена изоляция активной области методом ионной имплантации аргоном Ar на установке HVE 100. В качестве барьера Шоттки выступала система металлизации Ni/Au , которая также формировалась методом электронно—лучевого напыления [3]. Термический отжиг барьера Шоттки проводился при температуре 350 °С в течение 10 мин в атмосфере азота. После чего, в целях уменьшения последовательного сопротивления напыленных

Рис. 1. Схематическое изображение тестовой структуры HEMT

Fig. 1. Schematic of test HEMT structure

контактов, осаждалось гальваническое золото (Au) толщиной 2 мкм.

Непосредственно перед осаждением диэлектрика для удаления собственного оксида использовался травитель на основе 20%-ного раствора сульфида аммония, время травления составляло 1 мин. На тестовые транзисторные структуры осаждались пленки толщиной 200 нм.

Толщина осаждаемых на кремниевые подложки пленок нитрида кремния, необходимых для контроля параметров диэлектрика, была 100 нм. Для подготовки рабочей поверхности кремниевые пластины отмывались в стандартном травителе — смеси гидроксида аммония и перекиси водорода $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ в соотношении 1 : 4, в течение 3 мин с предварительным нагревом травителя; затем пластины промывались в деионизованной воде и сушились сжатым воздухом.

Измерение толщины пленок и показателя преломления n осуществлялось методом эллипсометрии на установке ЛЭМ-2М. Изображения срезов тестовых образцов были сделаны методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке JEOL JSM-6480LV с использованием остросфокусированного ионного пучка на установке FEI-601.

Измерение вольт—амперных характеристик (ВАХ) тестовых образцов проводилось с помощью анализатора характеристик полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Cascade Microtech PA200. Семейство выходных характеристик транзистора измерялось до напряжения смещения сток—исток 20 В, напряжение на затворе изменялось от 0 до -5 В с шагом 0,5 В, максимальная крутизна вольт—амперной характеристики определялась при напряжении $U_{с-и} = 10$ В. Токи утечки (неотсечки) сток—исток в закрытом состоянии измерялись при $U_{с-и} = 50$ В.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе измеряли значения показателя преломления и скорости роста диэлектрических пленок в зависимости от режимов осаждения (ме-

Рис. 2. Зависимость показателя преломления n от значений ICP и RF мощности

Fig. 2. Refraction index n as a function of ICP and RF power

нялись значения RF и ICP мощностей, соотношение потоков рабочих газов). Скорость осаждения при увеличении RF мощности практически не менялась, тогда как при увеличении ICP мощности наблюдался ее рост. Так, например, при RF = 1 Вт и ICP = 500 Вт скорость составила 0,25 нм/с, а при RF = 1 Вт и ICP = 2100 Вт она равнялась 0,75 нм/с.

На рис. 2 представлено изменение показателя преломления n пленки в зависимости от RF и ICP мощности. Из рис. 2 видно, что при увеличении ICP мощности от 500 до 2100 Вт происходит некоторое уменьшение значения показателя преломления, при изменении RF мощности с 1 до 8 Вт показатель преломления увеличивается. Наблюдаемое поведение показателя преломления с изменением RF и ICP мощностей можно связать с изменением состава получаемой диэлектрической пленки [22, 23]. При увеличении ICP мощности в пленке увеличивается содержание азота, что связано с увеличением степени диссоциации молекул азота в ICP источнике — это и приводит к уменьшению величины показателя преломления. Увеличение же RF мощности ведет к более интенсивному разложению молекул моносилана (моносилан подается через «душ» вблизи подложки), что соответственно приводит к увеличению показателя преломления из-за увеличения вхождения кремния в пленку.

На изготовленных тестовых образцах AlGaN/GaN гетероструктур с пассивацией нитридом кремния SiN_x были сделаны изображения срезов методом СЭМ. На рис. 3 продемонстрировано СЭМ-изображение среза тестового образца. Как видно из рис. 3, толщина пленки осажденного диэлектрика составила порядка 215 ± 10 нм, толщина пленки на

боковой поверхности — 150 ± 10 нм. Таким образом, осаждение можно считать практически конформным.

На тестовых образцах транзисторов были получены семейства выходных ВАХ. На рис. 4 продемонстрирована выходная характеристика для образца, пассивированного в следующем режиме: $P = 10$ мторр, $T = 100$ °C, RF = 1 Вт, ICP = 1200 Вт, $\text{SiH}_4/\text{N}_2 = 13,9/13,1$. Ток насыщения $I_{\text{с-и}}$ в открытом состоянии составил порядка 90 мА (ширина затвора 200 мкм), насыщение тока при нулевом напряжении на затворе достигалось при $U_{\text{с-и}} = 4$ В. Отсечка тестового транзистора происходила при $U_3 = -4,2$ В, ток исток—сток в закрытом состоянии был равен $I_{\text{неотс}} = 1,8$ мкА при 50 В напряжения смещения исток—сток.

Кроме того, в режиме, описанном выше, было получено наибольшее значение крутизны, которая составила $S = 115$ мСм/мм. Было выявлено, что крутизна транзистора сильно снижается с ростом RF мощности, ее максимум достигался при минимальной мощности RF = 1 Вт. Это связано с тем, что с увеличением RF мощности повышается автосмещение между плазмой и столиком, которое приводит к увеличению энергии бомбардирующих подложку ионов, что при невысоком давлении (10—100 мторр) приводит к сильным радиационным повреждениям поверхности. Как показал эксперимент, в начальный момент роста, даже при низких значениях RF мощности (3 Вт), структура транзистора становится полностью неработоспособной. Из этого следует, что процесс осаждения диэлектрика для пассивации НЕМТ необходимо начинать при максимально низких значениях RF мощности.

Разработанная технология была апробирована при производстве СВЧ НЕМТ с общей шири-

Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности тестового образца
Fig. 3. SEM image of test specimen surface

Рис. 4. Семейство выходных ВАХ AlGaIn/GaN HEMT с шириной затвора 200 мкм

Fig. 4. Output current vs voltage curves for 200 μm wide gate AlGaIn/GaN HEMT

ной Т-образного затвора от 1,25 до 5 мм, что позволило получить достаточно низкие токи транзисторов в закрытом состоянии без ухудшения характеристик в открытом состоянии: на уровне не более 15 и 100 мкА соответственно ($U_3 = -8$ В и $U_{C-и} = 50$ В).

Заключение

Показано, что метод ICP CVD позволяет получать конформные диэлектрические пленки SiN_x для пассивации AlGaIn/GaN HEMT.

Выбран и отработан базовый технологический процесс пассивации HEMT со следующими значениями параметров: $P = 10$ мторр, $T = 100$ °C, $\text{RF} = 1$ Вт, $\text{ICP} = 1200$ Вт, $\text{SiH}_4/\text{N}_2 = 13,9/13,1$. При таком режиме осаждения диэлектрика на тестовом образце AlGaIn/GaN HEMT были получены наименьшие токи в закрытом состоянии и наибольшая крутизна выходной ВАХ.

Отработанный режим пассивации позволяет получать низкие токи мощных СВЧ HEMT в закрытом состоянии без ухудшения характеристик в открытом состоянии.

Библиографический список

1. Арендаренко А. А., Орешкин В. А., Свешников Ю. Н., Цыпленков И. Н. Тенденции развития эпитаксиальной технологии нитридных соединений // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 5—15. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-5-15
2. Sun H., Liu M., Liu P., Lin X., Cui X., Chen J., Chen D. Performance optimization of lateral AlGaIn/GaN HEMTs with cap gate on 150-mm silicon substrate // Solid-State Electronics. 2017. V. 130. P. 28—32. DOI: 10.1016/j.sse.2017.01.006
3. Sleptsov E. V., Chernykh A. V., Chernykh S. V., Dorofeev A. A., Gladysheva N. B., Kondakov M. N., Sleptsova A. A., Panichkin A. V., Konovalov M. P., Didenko S. I. Investigation of the thermal annealing effect on electrical properties of Ni/Au, Ni/Mo/Au and Mo/Au Schottky barriers on AlGaIn/GaN heterostructures

// J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 816. P. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/816/1/012039

4. Kaushik J. K., Balakrishnan V. R., Mongia D., Kumar U., Dayal S., Panwar B. S., Muralidharan R. Investigation of surface related leakage current in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors // Thin Solid Films. 2016. V. 612. P. 147—152. DOI: 10.1016/j.tsf.2016.06.003

5. Huang H., Sun Z., Cao Y., Li F., Zhang F., Wen Z., Zhang Z., Liang Y. C., Hu L. Investigation of surface traps-induced current collapse phenomenon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with Schottky gate structures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51, N 34. P. 345102. DOI: 10.1088/1361-6463/aad455

6. Huang H., Liang Yu. C., Samudra G. S., Chang T.-F., Huang C.-F. Effects of gate field plates on the surface state related current collapse in AlGaIn/GaN HEMTs // IEEE Transactions On Power Electronics. 2014. V. 29, N 5. P. 2164—2173. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2288644

7. Енишерлова К. Л., Медведев Б. К., Темпер Э. М., Корнеев В. И. Влияние технологических факторов на характеристики омических контактов мощных AlGaIn/GaN/SiC-HEMT // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2018. Т. 21, № 3. С. 182—193. DOI: 10.17073/1609-3577-2018-3-182-193

8. Абрагян К. К. Задачи оптимизации наноразмерных полупроводниковых гетероструктур // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 2. С. 108—114. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-2-108-114

9. Chander S., Gupta S., Ajay, Gupta M. Enhancement of breakdown voltage in AlGaIn/GaN HEMT using passivation technique for microwave application // Superlattices and Microstructures. 2018. V. 120. P. 217—222. DOI: 10.1016/j.spmi.2018.05.039

10. Zhu G., Liang G., Zhou Y., Chen X., Xu X., Feng X., Song A. Reactive evaporation of SiO_x films for passivation of GaN high-electron-mobility transistors // J. Phys. Chem. Solids. 2019. V. 129. P. 54—60. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.12.021

11. Zhu G., Wang H., Wang Y., Feng X., Song A. Performance enhancement of AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistors by thermally evaporated SiO passivation // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109, N 11. P. 113503. DOI: 10.1063/1.4962894

12. Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H., Jimbo T., Sano Y. Surface passivation effects on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors with SiO_2 , Si_3N_4 , and silicon oxynitride // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84, N 4. P. 613—615. DOI: 10.1063/1.1642276

13. Kim H.-S., Han S.-W., Jang W.-H., Cho C.-H., Seo K.-S., Oh J., Cha H.-Y. Normally-off GaN-on-Si MISFET using PECVD SiON gate dielectric // IEEE Electron Device Lett. 2017. V. 38, Iss. 8. P. 1090—1093. DOI: 10.1109/LED.2017.2720719

14. Karouta F., Krämer M. C. J. C. M., Kwaspen J. J. M., Grzegorzczak A., Hageman P., Hoex B., Kessels W. M. M., Klootwijk J., Tim-

mering E., Smit M. K. influence of the structural and compositional properties of PECVD silicon nitride layers on the passivation of AlGaIn/GaN HEMTs // ECS Transactions. 2008. V. 16, N 7. P. 181–191. DOI: 10.1149/1.2983174

15. Сейдман Л. А. Формирование трехмерных структур в подложках карбида кремния плазмохимическим травлением // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 157–171. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-157-171

16. Lee J. J. Application of inductively coupled plasma to CVD and PVD // Surface & Coatings Technology. 2005. V. 200, Iss. 1–4. P. 31–34. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.113

17. Dutta G., DasGupta N., DasGupta A. Low-temperature ICP-CVD SiN_x as gate dielectric for GaN-based MIS-HEMTs // IEEE Transactions On Electron Devices. 2016. V. 63, Iss. 12. P. 4693–4701. DOI: 10.1109/TED.2016.2618421

18. Lee J. W., Mackenzie K. D., Johnson D., Sasserath J. N., Pearton S. J., Ren F. Low temperature silicon nitride and silicon dioxide film processing by inductively coupled plasma chemical vapor deposition // J. Electrochem. Soc. 2000. V. 147, N. 4. P. 1481–1486. DOI: 10.1149/1.1393382

19. Thomas O. Inductively coupled plasma chemical vapour deposition (ICP-CVD) // Oxford Instruments Plasma Technology.

2010. URL: <https://plasma.oxinst.com/campaigns/technology/icpcvd> (дата обращения: 24.07.2020).

20. Cho H.-J., Her J.-C., Lee K., Cha H.-Y., Seo K.-S. Low damage SiN_x surface passivation using remote ICP-CVD for AlGaIn/GaN HEMTs // Extended Abstracts of the 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials. Tsukuba (Japan), 2008. P. 504–505.

21. Кондаков М. Н., Черных С. В., Черных А. В., Подгорный Д. А., Гладышева Н. Б., Дорофеев А. А., Диденко С. И., Капров Д. Б., Жукова Т. А. Влияние режимов отжига на электрические параметры, морфологию и микроструктуру омических контактов на основе Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2018. № 2. С. 40–47. URL: http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/2018/2_249/kondakov.pdf (дата обращения: 24.07.2020).

22. Gereth R., Scherber W. Properties of ammonia-free nitrogen – Si₃N₄ films produced at low temperatures // J. Electrochem. Soc. 1972. V. 119, N 9. P. 1248–1254. DOI: 10.1149/1.2404452

23. Han I. K., Lee Y. J., Jo J. W., Lee J. I., Kang K. N. Growth and characterization of silicon-nitride films by plasma-enhanced chemical vapor deposition // Appl. Surf. Sci. 1991. V. 48–49. P. 104–110. DOI: 10.1016/0169-4332(91)90313-9

Статья поступила в редакцию 11 марта 2020 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 127–133. DOI: 10.17073/1609-3577-2020-2-127-133

Optimization of passivation in AlGaIn/GaN heterostructure microwave transistor fabrication by ICP CVD

A. A. Sleptsova¹, S. V. Chernykh^{1,2}, D. A. Podgorny^{1,§}, I. A. Zhilnikov²

¹ *National University of Science and Technology MISiS,
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia*

² *JSC “S&PE “Pulsar”,
27 Okruzhnoy Proezd, Moscow 105187, Russia*

Abstract. In present study is considered the influence of the regimes of passivating dielectric silicon nitride SiN_x films deposition by the chemical vapor deposition in an inductively coupled plasma (ICP CVD) on the parameters of the high electron mobility transistors (HEMT) based on AlGaIn/GaN heterostructures. By the investigation of dielectric material layers' parameters was revealed the influence of RF and ICP generators power, working gases flows ratio on the films growth rate and perfection, also their effect on the CVC of passivated HEMT. With RF power increasing the deposition rate did not change, while its growth was observed with ICP power increasing. The transistor slope strongly decreases with RF power increasing, its maximum was achieved with a minimum RF power of 1 W. At the initial moment of deposition even at low values of RF power (at 3 W already) the transistor structure becomes completely inoperative. Shown, that the deposition process of dielectrics for the HEMT passivation must begin at the lowest possible RF power. An AlGaIn/GaN UHF HEMT structure passivation process has been developed, allowing the deposition of conformal films and obtaining low drain-source currents in turn-off transistors without deterioration in the open state — at no more than 15 and 100 µA for 1,25 and 5 mm T-gate width respectively ($U_G = -8$ V and $U_{SD} = 50$ V).

Keywords: silicon nitride, plasma chemical vapour deposition, ICP CVD, AlGaIn/GaN HEMT, passivation, current-voltage characteristics

References

1. Arendarenko A. A., Oreshkin V. A., Sveshnikov Yu. N., Tsyplenkov I. N. Trends in the Development of the Epitaxial Nitride Compounds Technology. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy*.

Materialy Elektronnoi Tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 5–15. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-5-15

Information about authors:

Anastasia A. Sleptsova¹: Postgraduate Student (anastasiaa.sleptsova@gmail.com); **Sergey V. Chernykh**^{1,2}: Assistant (1), Head of Laboratory (2), ORCID 0000-0001-9821-7045 (chsv_84@mail.ru); **Dmitry A. Podgorny**^{1,§}: Cand. Sci. (Phys.-Math.) Associate Professor, Deputy Head of the Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics (podgorny_d@misis.ru); **Ilya A. Zhilnikov**²: Technician (Zhilnikov_ia@pulsarnpp.ru)

§ Corresponding author

2. Sun H., Liu M., Liu P., Lin X., Cui X., Chen J., Chen D. Performance optimization of lateral AlGaIn/GaN HEMTs with cap gate on 150-mm silicon substrate. *Solid-State Electronics*, 2017, vol. 130, pp. 28—32. DOI: 10.1016/j.sse.2017.01.006
3. Sleptsov E. V., Chernykh A. V., Chernykh S. V., Dorofeev A. A., Gladysheva N. B., Kondakov M. N., Sleptsova A. A., Panichkin A. V., Kononov M. P., Didenko S. I. Investigation of the thermal annealing effect on electrical properties of Ni/Au, Ni/Mo/Au and Mo/Au Schottky barriers on AlGaIn/GaN heterostructures. *J. Phys.: Conf. Series*, 2017, vol. 816, p. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/816/1/012039
4. Kaushik J. K., Balakrishnan V. R., Mongia D., Kumar U., Dayal S., Panwar B. S., Muralidharan R. Investigation of surface related leakage current in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 612, pp. 147—152. DOI: 10.1016/j.tsf.2016.06.003
5. Huang H., Sun Z., Cao Y., Li F., Zhang F., Wen Z., Zhang Z., Liang Y. C., Hu L. Investigation of surface traps-induced current collapse phenomenon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with Schottky gate structures. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018, vol. 51, no. 34, p. 345102. DOI: 10.1088/1361-6463/aad455
6. Huang H., Liang Yu. C., Samudra G. S., Chang T.-F., Huang C.-F. Effects of gate field plates on the surface state related current collapse in AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 5, pp. 2164—2173. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2288644
7. Enisherlova K. L., Medvedev B. K., Temper E. M., Korneev V. I. Influence of technological factors on the characteristics of ohmic contacts of powerful AlGaIn/GaN/SiC HEMT. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 182—193. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2018-3-182-193
8. Abgaryan K. K. Optimization problems of nanoscale semiconductor heterostructures. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 108—114. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2016-2-108-114
9. Chander S., Gupta S., Ajay, Gupta M. Enhancement of breakdown voltage in AlGaIn/GaN HEMT using passivation technique for microwave application. *Superlattices and Microstructures*, 2018, vol. 120, pp. 217—222. DOI: 10.1016/j.spmi.2018.05.039
10. Zhu G., Liang G., Zhou Y., Chen X., Xu X., Feng X., Song A. Reactive evaporation of SiO_x films for passivation of GaN high-electron-mobility transistors. *J. Phys. Chem. Solids*, 2019, vol. 129, pp. 54—60. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.12.021
11. Zhu G., Wang H., Wang Y., Feng X., Song A. Performance enhancement of AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistors by thermally evaporated SiO passivation. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, vol. 109, no. 11, p. 113503. DOI: 10.1063/1.4962894
12. Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H., Jimbo T., Sano Y. Surface passivation effects on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors with SiO₂, Si₃N₄, and silicon oxynitride. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 84, no. 4, pp. 613—615. DOI: 10.1063/1.1642276
13. Kim H.-S., Han S.-W., Jang W.-H., Cho C.-H., Seo K.-S., Oh J., Cha H.-Y. Normally-off GaN-on-Si MISFET using PECVD SiON gate dielectric. *IEEE Electron Device Lett.*, 2017, vol. 38, no. 8, pp. 1090—1093. DOI: 10.1109/LED.2017.2720719
14. Karouta F., Krämer M. C. J. C. M., Kwaspen J. J. M., Grzegorzczak A., Hageman P., Hoex B., Kessels W. M. M., Klootwijk J., Timmering E., Smit M. K. influence of the structural and compositional properties of PECVD silicon nitride layers on the passivation of AlGaIn/GaN HEMTs. *ECS Transactions*, 2008, vol. 16, no. 7, pp. 181—191. DOI: 10.1149/1.2983174
15. Seidman L. A. Formation of three-dimensional structures in silicon carbide substrates by plasmochemistry etching. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 157—171. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-157-171
16. Lee J. J. Application of inductively coupled plasma to CVD and PVD. *Surface & Coatings Technology*, 2005, vol. 200, no. 1-4, pp. 31—34. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.113
17. Dutta G., DasGupta N., DasGupta A. Low-temperature ICP-CVD SiN_x as gate dielectric for GaN-based MIS-HEMTs. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 2016, vol. 63, no. 12, pp. 4693—4701. DOI: 10.1109/TED.2016.2618421
18. Lee J. W., Mackenzie K. D., Johnson D., Sasserath J. N., Pearton S. J., Ren F. Low temperature silicon nitride and silicon dioxide film processing by inductively coupled plasma chemical vapor deposition. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, no. 4, pp. 1481—1486. DOI: 10.1149/1.1393382
19. Thomas O. Inductively coupled plasma chemical vapour deposition (ICP-CVD). *Oxford Instruments Plasma Technology*. 2010. URL: <https://plasma.oxinst.com/campaigns/technology/icpcvd> (accessed: 24.07.2020).
20. Cho H.-J., Her J.-C., Lee K., Cha H.-Y., Seo K.-S. Low damage SiN_x surface passivation using remote ICP-CVD for AlGaIn/GaN HEMTs. *Extended Abstracts of the 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials*. Tsukuba (Japan), 2008, pp. 504—505.
21. Kondakov M. N., Chernykh S. V., Chernykh A. V., Podgorny D. A., Gladysheva N. B., Dorofeev A. A., Didenko S. I., Kaprov D. B., Zhukova T. A. Effect of annealing conditions on electrical properties, surface morphology and microstructure of Mo/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructures. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. 2018, no. 2, pp. 40—47. (In Russ.). URL: http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/2018/2_249/kondakov.pdf (accessed: 24.07.2020).
22. Gereth R., Scherber W. Properties of ammonia-free nitrogen-Si₃N₄ films produced at low temperatures. *J. Electrochem. Soc.*, 1972, vol. 119, no. 9, pp. 1248—1254. DOI: 10.1149/1.2404452
23. Han I. K., Lee Y. J., Jo J. W., Lee J. I., Kang K. N. Growth and characterization of silicon-nitride films by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Appl. Surf. Sci.*, 1991, vol. 48-49, pp. 104—110. DOI: 10.1016/0169-4332(91)90313-9

Received March 11, 2020