

УДК 621.382-213

DOI:10.36815/2073-8250-2020-258-3-22-33

## ПЛЁНКИ $\text{SiN}_x$ , ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ PECVD, В КАЧЕСТВЕ ПАССИВАЦИИ $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ НЕМТ

*Л.А. Сейдман, Ю.А. Концевой, К.Л. Енишерлова, С.В. Миннебаев*  
АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, 27

*Исследован процесс получения методом PECVD диэлектрических защитных покрытий из  $\text{SiN}_x$  на структуры  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  для нахождения способов регулирования их свойств. Осаждение плёнок  $\text{SiN}_x$  вели в установке Plasmalab System 100 ICP180, достоинством которой является наличие источника ICP, дающего возможность формировать плазму высокой плотности без существенного увеличения ионной бомбардировки подложки и использовать в качестве одного из прекурсоров азот вместо аммиака, что снижает концентрацию водорода в плёнке. Осаждение плёнок  $\text{SiN}_x$  вели в различных режимах, чтобы определить степень влияния различных параметров осаждения на сдвиг  $C-V$  характеристик с целью устранить его или сделать положительным. Было показано, что достичь этого можно, если при осаждении плёнки  $\text{SiN}_x$  существенно увеличить поток азота в камеру установки.*

**Ключевые слова:** *гетероструктура  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ , защитное покрытие, фиксированный заряд, пьезополяризация, донорноподобные ловушки, поверхностные состояния,  $C-V$  характеристики, механические напряжения*

**Сведения об авторах:** *Сейдман Лев Александрович, к.т.н., seid1@yandex.ru; Концевой Юлий Абрамович, д.т.н.; Енишерлова Кира Львовна, д.т.н.; Миннебаев Станислав Вадимович*

## PECVD OBTAINED $\text{SiN}_x$ FILMS FOR THE PASSIVATION OF $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT

*L. A. Seydman, Yu. A. Kontsevoy, K. L. Enisherlova, S. V. Minnebaev*  
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy pr., 27

*In this paper we study the process of using PECVD to obtain  $\text{SiN}_x$  films, which serve as a dielectric passivation layers for  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  structures. Aim of this study was to determine the methods of controlling the properties of the films. The deposition of  $\text{SiN}_x$  films was carried out in a Plasmalab System 100 ICP180 featuring an ICP source, which makes possible to form a high-density plasma without a significant increase in ion bombardment of substrates, and to use nitrogen instead of ammonia as one of the precursors, which reduces the hydrogen concentration in the film. The deposition of  $\text{SiN}_x$  films was carried out in different modes in order to determine the influence of various deposition parameters on the shift of  $C-V$  characteristics, and to either eliminate the shift or make it positive. It was shown that this goal can be achieved by significantly increasing the nitrogen flow into the chamber during the deposition of  $\text{SiN}_x$  films.*

**Keywords:**  *$\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  heterostructure, protective dielectric layer, fixed charge, piezopolarization, donor-like traps, surface states,  $C-V$  characteristics, mechanical stress*

**Data on Authors:** *Lev Aleksandrovich Seydman, Ph.D., seid1@yandex.ru; Yulu Abramovich Kontsevoy, Sc.D., Kira Lvovna Enisherlova, Sc.D., Stanislav Vadimovich Minnebaev*

## Введение

Технология создания HEMTs на основе эпитаксиальных структур AlGaIn/GaN включает в себя нанесение диэлектрических защитных покрытий на эти структуры [1]. Роль таких изолирующих и одновременно пассивирующих защитных слоёв чаще всего играют плёнки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiON}$  [2, 3], используются также комбинации слоёв ряда диэлектриков –  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$  [4],  $\text{HfO}_2$  и  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  [5]. Среди различных диэлектриков защитные покрытия из нитрида кремния имеют важное преимущество: они уменьшают на несколько порядков ток утечки по поверхности AlGaIn [6]. Кроме того, широкому применению нитрида кремния способствует наличие известного процесса получения этих плёнок по технологии плазмохимического осаждения из газовой фазы в индуктивно связанной плазме (PECVD-plasma enhanced chemical vapor deposition) путём разложения в плазме моносилана и азота или аммиака и синтеза плёнки нитрида кремния на поверхностях рабочей камеры, в том числе на поверхности подложки [3, 7-12]. Участие плазмы в этом процессе позволяет проводить его при температурах подложки 200-300 °C вместо 800 °C как в обычном CVD процессе и использовать в качестве одного из прекурсоров азот вместо аммиака, что снижает концентрацию водорода в плёнке.

К сожалению, при осаждении защитных покрытий  $\text{SiN}_x$ , впрочем, как и других, возникает целый ряд проблем. Одна из самых существенных – сдвиг C-V характеристик гетероструктур иногда даже на десятки вольт после осаждения  $\text{SiN}_x$ , что говорит о большом электрическом положительном заряде, сформированном на границе раздела полученных структур  $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ .

Такой встроенный положительный заряд сильно затрудняет формирование на таких структурах транзисторов HEMT с заданными управляющими свойствами затворов [13, 14].

Причинами появления встроенного заряда и сдвига C-V характеристик могут быть образовавшиеся из-за ионной бомбардировки поверхностные ловушки на границе раздела  $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}$ . Неидеальная граница раздела  $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}$  с высокой плотностью ловушек зарядов на границе раздела действительно ухудшает электрические свойства полученных структур [14, 15]. С другой стороны, судя по многочисленным современным работам [8, 13, 16-19], именно внутренние механические напряжения в плёнке  $\text{SiN}_x$  главным образом создают после осаждения нитрида кремния сдвиг C-V характеристик структур  $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ . Кроме того, в плёнках может содержаться более чем 20 ат.% связанного водорода, образовавшегося при разложении моносилана  $\text{SiH}_4$ . Он тоже ухудшает электрические параметры структур, в частности, создаёт дополнительные ловушки [9, 15, 20].

Такой разброс мнений можно понять, потому что вполне возможно, что упомянутые причины могут в различных условиях действовать вместе или по отдельности и каждая из них может превалировать в работах различных исследователей. Поэтому здесь нет противоречий.

Несмотря на большой объём исследований плёнок  $\text{SiN}_x$  и значительное количество данных о зависимости свойств плёнок  $\text{SiN}_x$  от различных условий осаждения, эти данные являются недостаточно полными. В частности, сдвиг C-V характеристик структур AlGaIn/GaN после осаждения  $\text{SiN}_x$  изучен недостаточно подробно, хотя нулевой сдвиг C-V характеристик или

сдвиг в сторону положительных напряжений желателен для улучшения параметров изготавливаемых транзисторов [14]. Поэтому целью нашей работы стало исследование процесса PECVD диэлектрических защитных покрытий из  $\text{SiN}_x$  на структуры  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  для нахождения способов регулирования их свойств и, соответственно, их влияния на положение C-V характеристик и параметры проводящего канала.

Примечание. Получаемые в различных работах плёнки нитрида кремния далеко не всегда являются стехиометрическими  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , это объясняет использование в литературе символа  $\text{SiN}_x$  и даже  $\text{SiN}$  для обозначения осаждённого аморфного нитрида кремния.

### **Условия эксперимента**

Осаждение плёнок  $\text{SiN}_x$  вели в установке Plasmalab System 100 ICP180 фирмы Oxford Instruments Plasma Technology. Её достоинством является наличие источника индуктивно связанной плазмы (ICP), дающего возможность управления ВЧ мощностью возбуждения плазмы и независимо от этого ускорением ионов к подложке. Это позволяет формировать плазму высокой плотности без существенной ионной бомбардировки подложки [7].

Камера установки состоит из рабочей зоны в нижней своей части и источника ICP в верхней. Камера реактора была разделена заземлённым перфорированным экраном из дюралюминия между источником ICP и подложкодержателем. Экран содержал большое количество отверстий диаметром 20 мм. Этот разделяющий экран ослаблял ионную бомбардировку подложки и увеличивал вероятность ионизации частиц  $\text{SiH}_4$  около неё. Подача газов  $\text{SiH}_4$  и  $\text{N}_2$  в камеру была отдельная: азот входил в

камеру сверху источника ICP, а моносилан через распределительное кольцо, расположенное вблизи подложкодержателя, чтобы приблизить реакцию моносилана с азотом к подложке.

К источнику ICP для создания плотной плазмы был подключён ВЧ генератор с частотой 13,56 МГц, его используемая ВЧ мощность была 1200 Вт. Другой ВЧ генератор той же частоты подключён к подложкодержателю для независимой регулировки потенциала смещения подложки. В данной работе мощность ВЧ смещения держали на минимальном уровне 1,0 Вт, чтобы минимизировать возможные повреждения поверхности полупроводника из-за ионной бомбардировки. Высокая скорость диссоциации в источнике ICP позволила использовать в качестве прекурсора газ  $\text{N}_2$  вместо  $\text{NH}_3$ , что дало возможность получить пониженную концентрацию водорода в рабочей камере и, соответственно, в растущей плёнке.

Эксперименты с изменением потоков азота и моносилана выполнялись при сохранении заданного суммарного потока газов  $\text{SiH}_4$  и  $\text{N}_2$ , равного  $27 \text{ см}^3/\text{мин}$ , и постоянного рабочего давления  $1,33 \text{ Па}$ . Оно поддерживалось автоматически изменением степени открытия вакуумного затвора. Такое поддержание перечисленных параметров обеспечивало максимальное постоянство большинства условий проведения процесса. Исходным режимом процесса осаждения был: поток азота  $13,1 \text{ см}^3/\text{мин}$  и моносилана  $13,9 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Он обеспечивал получение плёнок нитрида кремния, близкого по составу к стехиометрическому (коэффициент преломления 1,95).

Подложки диаметром 52 мм вводили в камеру через откачиваемый шлюз и прижимали к подложкодержателю сапфировым

кольцом с отверстием диаметром 50 мм. Температуру подложки поддерживали 200 °С (с одним исключением), используя электрический нагреватель в подложкодержателе и подачу потока гелия 10 см<sup>3</sup>/мин между подложкой и подложкодержателем.

В качестве подложек использовали гетероструктуры, выращенные с помощью MOCVD эпитаксии слоѐв AlGaIn/GaN на сапфировой подложке. В них толщина слоя AlGaIn составляла 20 нм с молярным содержанием Al 0,26-0,28. Слоевое сопротивление проводящего канала этих структур было в диапазоне 300-340 Ом/кв. Непосредственно перед осаждением  $SiN_x$  образцы подвергали обработке 90 с в струе диметила, имеющей температуру 80 °С и формируемой под давлением 80 атм. Затем обработке 30 с струей изопропилового спирта, имеющей температуру 30 °С, с последующей сушкой в азоте.

Толщина и коэффициент преломления покрытия измерялись на контрольных кремниевых подложках с помощью эллипсометра L1165300 фирмы «Gartner» с длиной волны лазера 632,8 нм. Все измерения на каждом образце проводили в пяти точках. Судя по данным измерений, полученные плѐнки были довольно однородные по площади подложки. Разброс не превышал 0,11 % для толщины покрытия и 0,03 % для его коэффициента преломления.

Для измерения физических и электрических характеристик структур AlGaIn/GaN плѐнки  $SiN_x$  осаждали непосредственно на поверхность AlGaIn. Их C-V характеристики до и после осаждения определяли с помощью измерения на установке Semiconductor Measurement System MDC CSM/Win на частотах  $f = 1$  МГц, 100 кГц и 10 кГц. Измерения проводились с помощью ртутного измерительного зонда,

имеющего площадь 0,005 см<sup>2</sup>, второй контактный зонд имел кольцевую форму и площадь, в 38 раз превышающую площадь измерительного зонда. Электрические характеристики проводящего канала в структурах HEMTs до и после осаждения плѐнки были измерены на установке LEI-1600 Mobility Systems.

### **Полученные результаты и их обсуждение**

Известно, что сдвиг C-V характеристик и изменения параметров проводящего канала структур  $SiN_x/AlGaIn/GaN$ , вызванные осаждением плѐнок  $SiN_x$ , зависят от условий их получения и от состава осажѐнных плѐнок, главным образом от мощности и частоты генератора, используемого для возбуждения плазмы, отношения расходов реагирующих газов ( $SiH_4$  и  $N_2$ ), температуры осаждения и рабочего давления газов [8-12]. Поэтому для выяснения степени влияния некоторых из перечисленных параметров процесса на свойства плѐнок  $SiN_x$  и структур  $SiN_x/AlGaIn/GaN$  были проведены эксперименты с изменениями каждого из них.

Сила воздействия механических напряжений в осажѐнной защитной плѐнке  $SiN_x$  на свойства структур AlGaIn/GaN пропорциональна толщине этой плѐнки. Для определения степени влияния толщины защитного покрытия на сдвиг C-V характеристик провели в исходном режиме три процесса осаждения различной длительности: 18 с, 50 с и 168 с. Получили толщины покрытия соответственно 10, 30 и 90 нм. То есть скорость осаждения была 0,55-0,60 нм/с. Коэффициент преломления плѐнки можно было измерить эллипсометром только на толщинах не менее 30 нм. У обеих таких плѐнок он оказался 1,95, что говорит о том,

**Таблица**

**Зависимость сдвига C-V характеристик структур SiN<sub>x</sub>/AlGaN/GaN от толщины осаждённых плёнок SiN<sub>x</sub>**

Толщина плёнки SiN <sub>x</sub> , нм	10	30	90
Сдвиг C-V характеристик, В	-3	-19	-45

что плёнка состояла из нитрида кремния, близкого по составу к стехиометрическому.

Эксперимент показал, что после нанесения плёнок SiN<sub>x</sub> C-V характеристики эпитаксиальных структур AlGaN/GaN сдвинулись в сторону отрицательных напряжений. Величина сдвига оценивалась по изменению порогового напряжения, при котором измеряемая ёмкость становится практически нулевой. Полученные результаты по сдвигу C-V характеристик приведены в таблице, где показана зависимость сдвига C-V характеристик структур SiN<sub>x</sub>/AlGaN/GaN от толщины осаждённых плёнок SiN<sub>x</sub>, близкого по составу к стехиометрическому. Исходное пороговое напряжение примерно -5 В.

Величина сдвига следовала за толщиной покрытия: чем больше толщина плёнки, тем больше сдвиг C-V характеристик, что подтверждают результаты других исследований [21-23].

При оценке результатов, представленных в таблице, необходимо учитывать, что воздействие плазмы на поверхность слоя AlGaN на начальной стадии роста плёнки было одинаково у всех трёх образцов. Следовательно, были одинаковы и формирующиеся в поверхностном слое из-за бомбардировки ионами какие-либо точечные дефекты-ловушки, на которых мог сформироваться положительный заряд, как это предполагалось в работах [14, 15]. Поэтому можно считать, что в данном случае преобладающим фактором появления и изменений сдвига C-V характеристик

являются механические напряжения в защитной плёнке, как это утверждается в работах [8, 13, 16-19, 21-23]. Дело в том, что наносимые диэлектрические плёнки сами могут иметь внутренние напряжения. Их величина может быть от -1000 МПа (сжимающие) до +200 МПа (растягивающие) [13, 17]. Их наличие может приводить к изменению картины напряжений в эпитаксиальном слое AlGaN, причём этот эффект тем сильнее, чем толще плёнка SiN<sub>x</sub>, тем более что после удаления химическим травлением нанесённого защитного покрытия с подложек их пороговые напряжения восстановились, что подтверждает преобладающее влияние механических напряжений в плёнке SiN<sub>x</sub> на сдвиг C-V характеристик.

Одновременно со сдвигом C-V характеристик наблюдалось увеличение их наклона на участке изменения ёмкости, что свидетельствует о сопутствующем образовании на поверхности подложки некоторого количества точечных дефектов, формирующих ловушечные состояния. Тем не менее решающего влияния на величину сдвига эти дефекты не оказали. Кроме того, сравнение измерений при разных частотах (1 МГц и 10 кГц) показало, что на границе SiN<sub>x</sub>-AlGaN формируются ловушечные состояния, которые можно разделить на быстрые и медленные.

По некоторым достаточно многочисленным литературным источникам [9, 15-17, 20, 24-26], причиной механических напряжений в плёнке нитрида кремния является

ся водород, который образуется в камере при разложении моносилана и включается в растущую плѐнку, образуя там химические связи с кремнием и азотом. Причѐм известно, что концентрация атомов водорода в плѐнке значительно уменьшается с увеличением температуры осаждения [26]. Для проверки этого нанесли плѐнку  $SiN_x$  толщиной 55 нм, режим осаждения которой отличался от исходного повышенной температурой осаждения 400 °С. Целью было снизить коэффициент прилипания атомов водорода к поверхности плѐнки и тем уменьшить его содержание в составе плѐнки. Эксперимент показал, что изменений в свойствах плѐнки не произошло, то есть осаждение при 400 °С не изменило состав плѐнки, судя по её коэффициенту преломления 1,95, и практически не повлияло на величину сдвига C-V характеристик (-26 В). Таким образом, в нашем случае не водород из плазмы является важной причиной заметного сдвига C-V характеристик.

В следующих экспериментах меняли другие параметры осаждения плѐнки нитрида. Например, увеличили поток моносилана путѐм увеличения соотношения потоков моносилана и азота в процессе осаждения до 16,6 см<sup>3</sup>/мин к 10,4 см<sup>3</sup>/мин. Это дало уменьшение скорости с 0,6 до 0,36 нм/с, что произошло из-за сопутствующего снижения потока азота в источник ИСР и, соответственно, потока ионов азота и ускоренных электронов из источника ИСР в камеру. В результате увеличился коэффициент преломления плѐнки до 2,72 из-за избытка в ней кремния. Сдвиг C-V характеристик получился средний по величине, но опять-таки отрицательный (-13 В).

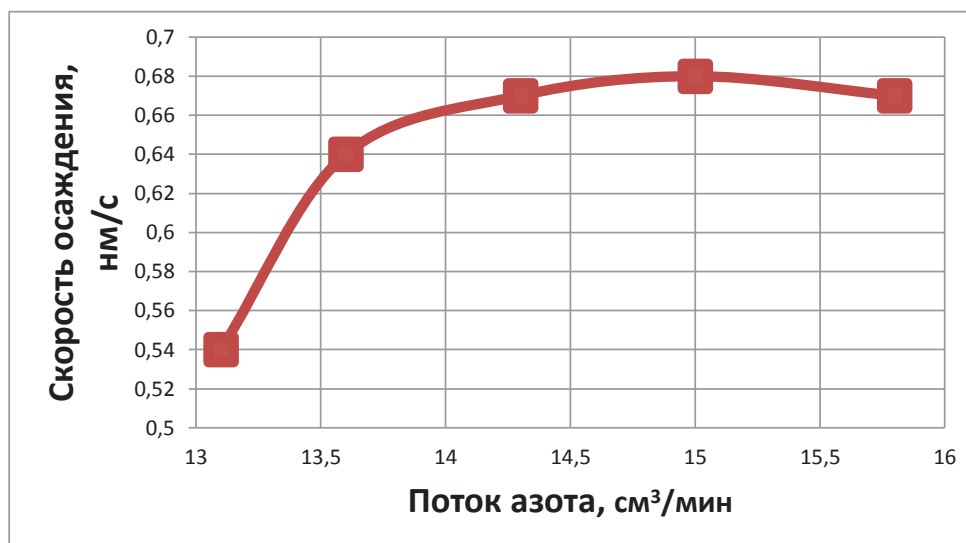
Увеличение вдвое рабочего давления при постоянстве потоков обоих газов путѐм прикрытия затвора установки могло

увеличить степень разложения моносилана и вероятность осаждения активных частиц на поверхности подложки. Проявилось это в небольшом увеличении скорости осаждения с 0,6 до 0,65 нм/с, но не изменило состава плѐнки  $SiN_x$  (коэффициент преломления остался 1,95) и величины сдвига C-V характеристик структур  $SiN_x/AlGaIn/GaN$ .

Таким образом, как показали вышеописанные эксперименты, увеличение температуры осаждения, увеличение вдвое рабочего давления и уменьшение открытия затвора не влияли на свойства полученных плѐнок  $SiN_x$  и на сдвиг C-V характеристик.

Среди параметров процесса осаждения отношение расходов газов-прекурсоров – один из основных параметров, который влияет на состав получаемых плѐнок  $SiN_x$  и механические напряжения в них [17]. Поэтому следующие эксперименты имели целью оценить влияние концентраций основных компонентов плѐнки (кремния и азота) на её свойства. В нашем случае изменяемым фактором стал поток азота в камеру. Провели 5 процессов осаждения плѐнок  $SiN_x$  при различных потоках азота: 13,1, 13,6, 14,3, 15 и 15,8 см<sup>3</sup>/мин. Им соответствовали потоки моносилана: 13,9, 13,4, 12,7, 12 и 11,2 см<sup>3</sup>/мин. Время осаждения составляло 150 с, полученная толщина плѐнок была 95-110 нм на подложках из кремния и GaN. Результаты эксперимента приведены на рис. 1-3.

В исходном режиме при потоке азота 13,1 см<sup>3</sup>/мин скорость была сравнительно невысокой – 0,54 нм/с (рис. 1), и это несмотря на сопутствующий большой поток моносилана 13,9 см<sup>3</sup>/мин. С увеличением потока азота с 13,1 до 15,8 см<sup>3</sup>/мин и соответствующим снижением потока моносилана скорость осаждения сначала росла с 0,54 до 0,67 нм/с. Объясняется это

**Рис. 1**

Скорость осаждения плёнки  $\text{SiN}_x$  в зависимости от потока азота

тем, что быстрота ионизации и разложения моносилана пропорциональна потоку ускоренных электронов и ионов азота из источника ICP в камеру. Поэтому всякое увеличение потока азота, даже сопровождающееся уменьшением потока моносилана, приводило к большей степени разложения моносилана и соответствующему росту скорости осаждения. При больших же потоках азота 14,3, 15 и 15,8 см³/мин скорость осаждения достигала насыщения и оставалась примерно одинаково высокой – 0,67-0,68 нм/с. Она более не росла при высоких потоках азота, поскольку поток моносилана становился уже слишком малым. Это совпадает с результатами, наблюдавшимися в работе [17].

Коэффициент преломления плёнки  $\text{SiN}_x$  с увеличением потока азота, естественно, монотонно снижался: 1,95, 1,88, 1,825, 1,785 и 1,77 (рис. 2), что объясняется увеличением концентрации азота в плёнке. Это тоже совпадает с результатами, наблюдавшимися в работе [17]. Скорость снижения коэффициента преломления уменьшалась

с увеличением потока азота, что говорит о приближении к максимально возможному насыщению азотом плёнки  $\text{SiN}_x$ .

Изменение потока азота в диапазоне 13,1-15,8 см³/мин существенно влияло и на сдвиг C-V характеристик (рис. 3). При повышенных потоках азота 13,5-15,8 см³/мин величина сдвига практически равна нулю и даже демонстрирует небольшой положительный сдвиг. То есть нанесённая в таких режимах плёнка практически не влияет на положение исходных C-V характеристик структур  $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ . Итак, регулируя поток азота, можно оптимизировать величину порогового напряжения C-V характеристик структур  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  и, следовательно, положение управляющей характеристики изготовленной на её основе структуры НЕМТ.

В результате экспериментов пришли к оптимальному с точки зрения минимизации сдвига C-V характеристик режиму, который отличался от исходного большим потоком азота 15,8 см³/мин и меньшим потоком моносилана 11,2 см³/мин.

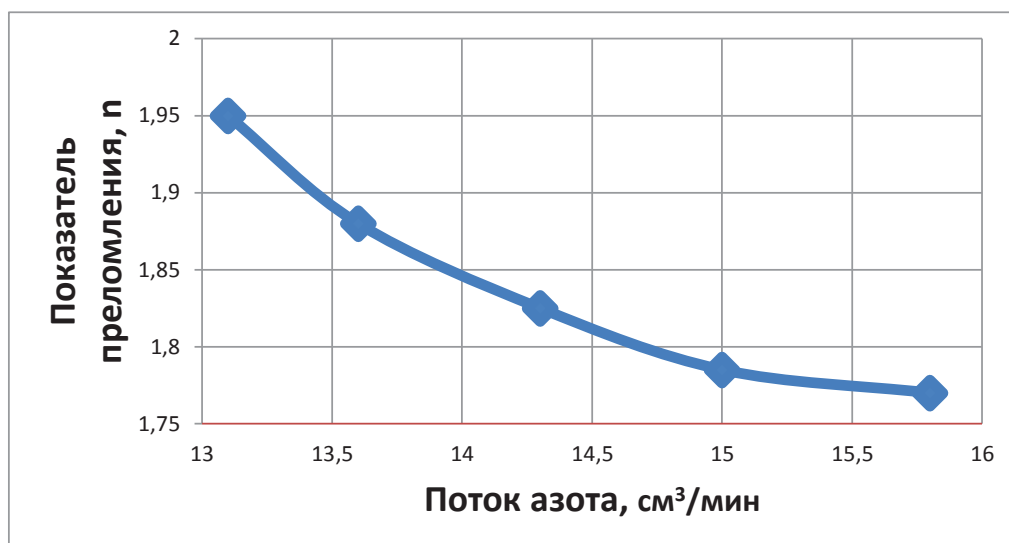


Рис. 2

Показатель преломления плёнки  $SiN_x$  в зависимости от потока азота



Рис. 3

Сдвиг C-V характеристик после осаждения плёнки  $SiN_x$  в зависимости от потока азота

Во всех вышеописанных экспериментах осаждения плёнки  $SiN_x$  слои сопротивление канала структуры HEMT росло в небольших пределах 0-10%. Такое поведение имело место у всех структур после осаждения плёнок, существенно различающихся по режимам осаждения и полученными параметрами (толщиной и коэффициентом преломления), а также значительно отли-

чающихся создаваемым ими сдвигом C-V характеристик. Это свидетельствует о том, что воздействия плазмы в процессе осаждения и самих осаждаемых плёнок  $SiN_x$  было недостаточно для существенного изменения свойств слоя AlGaIn и соответствующего ему изменения величины слоевого сопротивления проводящего канала. После удаления химическим травлением



нанесённой защитной плёнки слоиное сопротивление снижалось до исходной величины, что подтверждает неизменность свойств слоя AlGaIn при осаждении плёнок SiN<sub>x</sub> в указанном режиме.

После осаждения плёнки SiN<sub>x</sub> и после термообработки полученных структур в азоте в течение 10 мин при 500 °C слоиное сопротивление и другие параметры канала возвращались к исходной величине. Однако положение C-V характеристик при этом практически не менялось. Оно оставалось таким, каким оно стало после осаждения плёнки.

Аналогичные результаты были получены в работе [27], где рассмотрены величины параметров проводящего канала структур AlGaIn/GaN в трёх стадиях процесса: до осаждения, после осаждения SiN<sub>x</sub> и после термообработки образцов при 425 °C в азоте. В ней было показано, что свойства канала в структурах с содержанием алюминия 18 % в эпитаксиальном слое AlGaIn толщиной более 14 нм при термообработке восстанавливают свои первоначальные значения, в то время как свойства структуры с меньшей толщиной этого слоя или меньшим содержанием алюминия необратимо меняются после осаждения SiN<sub>x</sub>. Это касается всех трёх параметров канала: слоиное сопротивление, концентрации электронов и их подвижности.

Различие в реакции слоиного сопротивления и сдвига C-V характеристик на технологические операции (осаждение плёнки SiN<sub>x</sub>, её отжиг и удаление) означает, что механизмы влияния процесса осаждения и самих осаждённых защитных плёнок нитрида кремния на C-V характеристики НЕМТ структур и свойства их проводящего канала различны.

## Заключение

В режиме осаждения, при котором получают близкие к стехиометрическим покрытия нитрида кремния, в структурах SiN<sub>x</sub>/AlGaIn/GaN образуется существенный положительный заряд, который вызывает большой сдвиг C-V характеристик в сторону отрицательных напряжений. Выявлена степень влияния основных технологических факторов нанесения защитного покрытия, влияющих на сдвиг C-V характеристик и на величину слоиного сопротивления. Показано, что радикально устранить сдвиг C-V характеристик позволила существенная добавка потока азота в камеру при осаждении SiN<sub>x</sub>. При ней сдвиг становится нулевым и даже слабоположительным. Одновременно возрастала скорость осаждения плёнки и существенно снижался её коэффициент преломления. Таким образом, регулируя поток азота в рабочую камеру установки, можно оптимизировать величину порогового напряжения C-V характеристик структуры SiN<sub>x</sub>/AlGaIn/GaN и, следовательно, управляющие свойства затворов НЕМТ, созданных на основе этой структуры.

## Литература

1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй. – Москва: Техносфера, 2011. – 587 с.
2. S. Arulkumaran S., G. I. Ng, and Z. H. Liu. Effect of gate-source and gate-drain Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivation on current collapse in AlGaIn / GaIn high-electron-mobility transistors on silicon. – Applied Physics Letters, 2007, vol. 90, iss.17, p.173504. DOI: 10.1063/1.2730748
3. Юнин, П. А. Слои Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для in situ пассивации транзисторных структур на основе GaIn / П.А. Юнин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, С.А. Королёв, А.И. Охалкин, О.И. Хрыкин, В. И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – № 11. – С. 1469-1472.

4. Wang C. X. et al. Superior suppression of gate current leakage in  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$  bilayer-based AlGaN / GaN insulated gate heterostructure field-effect transistors. – Journal of Electronic Materials, 2005, vol. 34, iss. 4, pp. 361-364. DOI: 10.1007/s11664-005-0111-8
5. Lu W. et al. A comparative study of surface passivation on AlGaN/GaN HEMTs. – Solid-State Electronics. – 2002, vol. 46, iss. 9, pp. 1441-1444. DOI:10.1016/S0038-1101(02)00089-8
6. Kotani J., Hashizume T., Hasegawa H. Analysis and control of excess leakage currents in nitride-based Schottky diodes based on thin surface barrier model. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2004, vol. 22, iss. 4, pp. 2179-2189. DOI: 10.1116/1.1771678
7. Берлин, Е. В. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения / Е.В. Берлин, В.Ю. Григорьев, Л.А. Сейдман. – Москва: Техносфера, 2018. – 462 с.
8. Новак, А. В. Зависимость механических напряжений в плёнках нитрида кремния от режимов плазмохимического осаждения / А.В. Новак, В.Р. Новак, А.А. Дедкова, Е.Э. Гусев // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 2. – С. 138. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-138-146
9. Кутков, И.В. Качественный и количественный анализ плёнок нитрида кремния методом ИК-спектроскопии / И.В. Кутков, М.И. Пехтелев // Докл. ТУСУРа. – 2014. – Вып. 31. – № 1. – С. 92–94.
10. Рубцевич, И.И. Исследование свойств плёнок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку / И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.Б. Высоцкий и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 4. – С. 29–32.
11. Li Dong-ling, Feng Xiao-fei, Wen Zhi-yu et al. Stress control of silicon nitride films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. Optoelectronics Letters, 2016, vol.12, iss.4, pp. 0285–0289. DOI: 10.1007/s11801-016-6058-6
12. L.L. Vanzetti, M. Barozzi, D. Giubertoni et al. Correlation between silicon-nitride film stress and composition: XPS and SIMS analyses. Surface and Interface Analysis, 2006, vol. 38, iss.4, pp. 723–726. DOI: 10.1002/sia.2284
13. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGaN / GaN high electron mobility transistors, Doctor of Philosophy in materials Science and engineering. Massachusetts Institute of Technology, Materials Science and Engineering, June 2017, 161p.
14. Matys M. et al. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGaN interfaces and its control by AlGaN composition. Applied Physics Letters, 2017, vol. 110, iss. 24, p. 243505. DOI: 10.1063/1.4986482
15. Gweon G. H. et al. Effect of DC bias voltage on the characteristics of low temperature silicon–nitride films deposited by internal linear antenna inductively coupled plasma source. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, vol. 49, iss. 5R, p. 056505. DOI: 10.1143/JJAP.49.056505
16. Dergez D. et al. Fundamental properties of a-SiNx: H thin films deposited by ICP-PECVD for MEMS applications. Applied Surface Science, 2013, vol. 284, pp. 348-353. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.104
17. Dergez D. et al. Low-stress and long-term stable a-SiNx: H films deposited by ICP-PECVD Procedia Engineering, 2014, vol. 87, pp. 100-103. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.392
18. Osipov K. Y. et al. Effect of External Mechanical Stress on DC Performance and Reliability of Integrated E/D GaN HEMTs. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2018, vol. 31, iss. 4, pp. 419-425. DOI 10.1109/TSM.2018.2865106
19. Dinara S. M. et al. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due to  $\text{Si}_3\text{N}_4$  passivation on Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N/GaN heterostructure: strain and interface capacitance analysis. AIP Advances, 2015, vol. 5, iss. 4, pp. 047136-047136-11. DOI: 10.1063/1.4919098
20. Zhou H. et al. Low-hydrogen-content silicon nitride

- deposited at room temperature by inductively coupled plasma deposition. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, vol. 45, iss. 10B. – p. 8388. DOI:10.1143/JJAP.45.8388
21. Jiang H. et al. Investigation of In situ SiN as gate dielectric and surface passivation for GaN MISHEMTs. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, vol.64, no. 3, pp. 832-839. DOI:10.1109/TED.2016.2638855
22. Cheng W. C. et al. Silicon nitride stress liner impacts on the electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE International conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2019. DOI:10.1109/EDSSC.2019.8754212
23. Cheng W. C. et al. Threshold voltage improvement and leakage reduction of AlGaIn/GaN HEMTs using dual-layer SiNx stressors. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.00125>
24. Morin P. et al. Study of stress in tensile nitrogen-plasma-treated multilayer silicon nitride films. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2011. – T. 29. – №. 4. – C. 041513. DOI:10.1116/1.3602082
25. Morin P. F. et al. Modeling stress development and hydrogen diffusion in plasma enhanced chemical vapor deposition silicon nitride films submitted to thermal cycles. Journal of Applied Physics, 2013, vol. 114, no. 15, pp. 154113154113-6. DOI:10.1063/1.4826208
26. Surana V. K. et al. Realization of high quality silicon nitride deposition at low temperatures. Journal of Applied Physics, 2019, vol. 126, no. 11, pp. 115302. DOI:10.1063/1.5114927
27. Pletschen W. et al. Changes of electronic properties of AlGaIn/GaN HEMTs by surface treatment. Wide-Bandgap materials for Solid-State lighting and Power, 2014, vol. 1736. DOI: 10.1557/opl.2014.937
- collapse in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on silicon. Applied Physics Letters, 2007, no. 90, 173504 p. DOI: 10.1063/1.2730748
3. Yunin P. A., Drozdov Yu. N., Drozdov M. N., Korolyov S. A., Okhapkin A. I., Khrykin O. I., Shashkin V. I. Sloi Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dlya in situ passivatsii tranzistornykh struktur na osnove GaN [Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layers for in-situ passivation of GaN-based transistor structures]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 2015, vol. 49, no. 11, pp. 1469-1472.
4. Wang C. X. et al. Superior suppression of gate current leakage in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bilayer-based AlGaIn/GaN insulated gate heterostructure field-effect transistors. Journal of electronic materials, 2005, vol. 34, no. 4, pp. 361-364. DOI:10.1007/s11664-005-0111-8
5. Lu W. et al. A comparative study of surface passivation on AlGaIn/GaN HEMTs. Solid-State Electronics, 2002., vol. 46, no. 9, pp. 1441-1444. DOI:10.1016/S0038-1101(02)00089-8
6. Kotani J., Hashizume T., Hasegawa H. Analysis and control of excess leakage currents in nitride-based Schottky diodes based on thin surface barrier model. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2004, vol. 22, no. 4, pp. 2179-2189. DOI:10.1116/1.1771678
7. Berlin E., Grigoryev V., Seydman L. Sloi Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dlya in situ passivatsii tranzistornykh struktur na osnove GaN [Inductive sources of high-density plasma and their applications]. Tekhnosfera, 2019, 462 p.
8. Novak A. V., Novak V. R., Dedkova A. A., Gusev E. E. Zavisimost' mekhanicheskikh napryazheniy v plyonkakh nitrida kremniya ot rezhimov plazmokhimicheskogo osazhdeniya [Dependence of mechanical stress in silicon nitride films on various modes of plasma-chemical depositions]. Izvestiya vuzov, elektronika, 2017, vol. 22, no. 2, 138 p. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-138-146
9. Kutkov I. V., Pekhtev M. I., Kachestvennyy i kolichestvennyy analiz plonok nitrida kremniya metodom IK-spektroskopii [Qualitative and quantitative analysis of silicon nitride films using IR-spectroscopy]. Doklady TUSUR, 2014, iss. 31, no. 1, pp. 92-94.

## References

1. Quay R. Elektronika na osnove nitride galliya [Gallium nitride electronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2011, 587 p.
2. Arulkumaran S., Ng G. I., Liu Z. H. Effect of gate-source and gate-drain Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivation on current

10. Rubtsevich I. I., Solovyev V. B., Vysotskiy V. B. et al. Issledovaniye svoystv plonok nitrida i oksida kremniya, poluchennykh metodom plazmokhimicheskogo osazhdeniya na kremniyevuyu podlozhku [Investigation of the properties of silicon nitride and silicon oxide films obtained by plasma-chemical deposition on a silicon substrate]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2011, no. 4, pp. 29-32.
11. Li Dong-ling, Feng Xiao-fei, Wen Zhi-yu et al. Stress control of silicon nitride films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Optoelectron. Lett.*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 0285–0289. DOI:10.1007/s11801-016-6058-6
12. Vanzetti L. L., Barozzi M., Giubertoni D. et al. Correlation between silicon-nitride film stress and composition: XPS and SIMS analyses. *Surf. Inter. Analysis*, 2006, vol. 38, pp. 723–726. DOI: 10.1002/sia.2284
13. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. Massachusetts Institute of Technology, 2017.
14. Matys M. et al. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGaIn interfaces and its control by AlGaIn composition. *Applied physics letters*, 2017, vol. 110, no. 24, p. 243505 DOI:10.1063/1.4986482
15. Gweon G. H. et al. Effect of DC Bias Voltage on the Characteristics of Low Temperature Silicon–Nitride Films Deposited by Internal Linear Antenna Inductively Coupled Plasma Source. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, no. 5R, 056505 p. DOI:10.1143/JJAP.49.056505
16. Dergez D. et al. Fundamental properties of a-SiNx: H thin films deposited by ICP-PECVD for MEMS applications. *Applied surface science*, 2013, vol. 284, pp. 348-353. DOI:10.1016/j.apsusc.2013.07.104
17. Dergez D. et al. Low-stress and long-term stable a-SiNx: H films deposited by ICP-PECVD. *Procedia Eng*, 2014, vol. 87, pp. 100-103. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.392
18. Osipov K. Y. et al. Effect of External Mechanical Stress on DC Performance and Reliability of Integrated E/D GaIn HEMTs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, vol. 31, no. 4, pp. 419-425. DOI 10.1109/TSM.2018.2865106
19. Dinara S. M. et al. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due to Si3N4 passivation on Al0.3Ga0.7N/GaN heterostructure: strain and interface capacitance analysis. *AIP Advances*, 2015, vol. 5, no. 4, 047136 p. DOI:10.1063/1.4919098
20. Zhou H. et al. Low-hydrogen-content silicon nitride deposited at room temperature by inductively coupled plasma deposition. *Japanese journal of applied physics*, 2006, vol. 45, no. 10S, 8388 p. DOI:10.1143/JJAP.45.8388
21. Jiang H. et al. Investigation of in situ SiN as Gate Dielectric and Surface Passivation for GaIn MISHEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 832-839. DOI:10.1109/TED.2016.2638855
22. Cheng W. C. et al. Silicon Nitride Stress Liner Impacts on the Electrical Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs. arXiv preprint arXiv:1903.05290, 2019. DOI:10.1109/edssc.2019.8754212
23. Cheng W. C. et al. Threshold Voltage Improvement and Leakage Reduction of AlGaIn/GaN HEMTs Using Dual-Layer SiNx Stressors. arXiv preprint arXiv:1908.00125. – 2019.
24. Morin P. et al. Study of stress in tensile nitrogen-plasma-treated multilayer silicon nitride films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2011, vol. 29, no. 4, 041513 p. DOI:10.1116/1.3602082
25. Morin P. F. et al. Modeling stress development and hydrogen diffusion in plasma enhanced chemical vapor deposition silicon nitride films submitted to thermal cycles. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, no. 15, 154113 p. DOI:10.1063/1.4826208
26. Surana V. K. et al. Realization of high quality silicon nitride deposition at low temperatures. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, no. 11, 115302 p. DOI:10.1063/1.5114927
27. Pletschen W. et al. Changes of electronic properties of AlGaIn/GaN HEMTs by surface treatment. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 2014, vol. 1736. DOI: 10.1557/opl.2014.937