

Модификация параметров AlGaN/GaN-транзисторных структур пассивацией и обработкой в водородной плазме

© А.В. Ковальчук,¹ В.Е. Земляков,² С.И. Карцев,² Д.С. Шпаков,² С.Ю. Шаповал¹

¹ Институт проблем проблем технологий микроэлектроники и особочистых материалов РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

² Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“ (МИЭТ), 124498 Москва, Россия
e-mail: anatoly-fizmat@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 мая 2025 г.

В окончательной редакции 7 августа 2025 г.

Принято к публикации 14 августа 2025 г.

Продемонстрирована эффективность пассивации AlGaN/GaN-транзисторных структур низкотемпературным нитридом кремния $H_xSi_rN_zH_y$. Показано значительное увеличение крутизны вольт-амперной характеристики, тока насыщения и коэффициента полезного действия. Разработан эффективный процесс гидрогенизации объема $H_xSi_rN_zH_y$ /AlGaN/GaN-транзисторных структур, который включает: изменения зарядовых состояний в объеме диэлектрика $H_xSi_rN_zH_y$ и состояний, связанных с границей раздела $H_xSi_rN_zH_y$ /AlGaN, а также пассивацию атомами водорода точечных дефектов кристаллической структуры в эпитаксиальных слоях AlGaN и GaN. Как процесс пассивации нитридом кремния, так и процесс гидрогенизации разработаны на основе технологии с использованием плазмы электронного циклотронного резонанса. Процесс гидрогенизации является эффективным и простым решением для компенсации негативных процессов термодеструкции (депассивации), которые протекают на высокотемпературных ($> 600^\circ\text{C}$) стадиях в технологическом цикле производства AlGaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Ключевые слова: AlGaN HEMTs, 2DEG, электронный циклотронный резонанс, ЭЦР-плазма, пассивацияловушечных состояний, нитрид кремния, гидрогенизация полупроводниковых структур.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62293.109-25

Введение

Ранее было показано, что пассивация нитридом кремния AlGaN HEMTs (High Electron Mobility Transistors) на основе нелегированных гетероструктур, в которых двумерный электронный газ 2DEG (Two-dimensional electron gas) формируется за счет поляризации, позволяет устранить эффект коллапса тока [1]. Сильная электрическая поляризация, присутствующая в нелегированных псевдоморфных структурах $Al_xGa_{1-x}N/GaN$, выращенных на грани Ga, индуцирует 2DEG с поверхностной плотностью около $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при значениях $0.3 < x < 0.4$ [2]. Эта нелегированная структура имеет некоторые преимущества перед легированными HEMT-структурами. Такие как более высокая подвижность электронов, на несколько порядков меньший шум $1/f$ и более низкое электрическое поле под затвором для достижения условия перекрытия канала [2]. Тем не менее эффекты захвата носителей заряда (объемные незаполненные дислокационные состояния и/или состояния, связанные с поверхностью) приводят к падению тока во время работы под высоким напряжением или в импульсном режиме [1,2]. Для уменьшения туннелирования электронов с области 2DEG на состояния, связанные с поверхностью гетероструктуры, широко используется пассивация нитридом кремния.

Опубликованы результаты плазмохимического осаждения нитрида кремния из газовой фазы в процессе с высокочастотной (ВЧ) плазмой [3] и в процессе с плазмой электронного циклотронного резонанса ECR — CVD (electron cyclotron resonance — chemical vapour deposition) [1]. Пассивация нитридом кремния транзисторных структур позволяет улучшить их выходные характеристики. Это можно объяснить либо пассивацией водородом электрически активных центров, либо влиянием положительного заряда, возникающего в нитриде кремния, содержащего водородные связи, либо влиянием обоих этих механизмов.

Позднее были опубликованы положительные результаты повышения характеристик транзисторных структур и на основе легированных AlGaN-эпитаксиальных структур с применением различных способов и материалов пассивирующих слоев. Таких как пассивация нитридом кремния в индуктивно связанной плазме [4]; использование толстых пленок нитрида кремния, осажденных методом LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) [5]; с применением катализа [6]; *in-situ*-пассивация [7]; использование органических материалов [8]; пленок двуокиси кремния [9,10]; слоев окиси алюминия [11]; нитрида алюминия [12,13]; нитрида алюминия и окиси гафния [14]; слоев AlTiO [15].

Все перечисленные методы дают заметное улучшение параметров транзисторных структур. Однако, по

мнению авторов, необходимо учитывать влияние водорода, растворенного (ван-дер-ваальсово связанного) в выращенных epitаксиальных структурах AlGaN, и необходимо учитывать влияние водородных химических связей в пассивирующем слое и на границе раздела $H_xSi_xN_xH_y/AlGaN$. Этот водород оказывает влияние на уровни энергии ловушечных состояний. Поэтому необходимо учитывать изменение концентрации растворенного и изменение концентрации химически связанного водорода в процессе производства транзисторных структур.

В то же время структуры на основе AlGaN/GaN и других твердых растворов, как правило, формируются в виде гетероструктур на подложках других материалов (кремний, карбид кремния, сапфир и другие), в результате чего из-за существенного несоответствия решеток, термических напряжений и других параметров эти структуры имеют высокую плотность сквозных (прорастающих) дислокаций до уровня 10^7 – 10^{11} см^{-2} [16–19]. Вокруг ядра этих дислокаций формируются области (размером порядка нескольких нанометров) с высокой плотностью дефектов с характеристиками, соответствующими акцепторам. Естественно, что это приводит к рассеянию и рекомбинации носителей заряда [20–24], ухудшению параметров транзисторных структур (ток насыщения, ток утечки, коллапс тока, уровень шума, радиационная стойкость и др.) [25–30]. Однако электронные структуры на основе нитридов третьей группы могут иметь превосходные параметры при плотности дислокаций, как было отмечено выше, на много порядков превышающую плотность дислокаций в структурах на основе кремния, арсенида галлия и многих других [31,32]. Механизм этого явления до сих пор не вполне ясен.

Экспериментально вакансии фиксируются методом аннигиляции позитронов [19,33–35]. Эти результаты показывают, что вакансии Ga присутствуют в концентрациях 10^{17} – 10^{18} см^{-3} в нелегированных объемных кристаллах и слоях GaN, тогда как образцы, легированные Mg, свободны от вакансий Ga. Вакансии Ga заряжены отрицательно, и их концентрация коррелирует с интенсивностью желтой полосы люминесценции. Повидимому, вакансии Ga способствуют электрической компенсации *n*-типа GaN, а их акцепторные уровни участвуют в генерации желтой полосы люминесценции.

Для прямого наблюдения вакансий используется метод прямой визуализации в реальном пространстве на сколотой поверхности GaN с помощью атомно-силовой микроскопии и сканирующей туннельной микроскопии [36].

Расчеты с использованием методов на основе первых принципов [37,38] показывают, что водород может и компенсировать вакансию, отдавая электрон на уровень акцептора, и пассивировать вакансию, образуя комплекс водород–вакансия [37]. Не так давно было показано на основе расчетов из первых принципов, что удаление глубоких состояний из краевых дислокаций может быть

осуществлено и путем кислородной пассивации после роста кристаллов GaN [39].

В то же время методы исследования вакансий с применением аннигиляции позитронов и атомно-силовой микроскопии сопряжены с существенным воздействием на образцы из-за присутствия высокоэнергетических частиц и возможных заметных механических повреждений и, как следствие, возбуждения механических напряжений в кристаллической структуре. А расчеты на основе первых принципов могут приводить к существенным отклонениям от экспериментальных данных [37,38,40].

В связи с этим методы изучения вакансий в нитридах третьей группы с применением люминесценции в желтой полосе [41] и вольт-фарадных характеристик с DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) могут оказаться перспективными [42].

В epitаксиальных структурах на основе нитридов галлия после epitаксии фиксируется большая концентрация водорода [42–44]. Это может способствовать сохранению высоких электрофизических характеристик транзисторных структур, так как водород может пассивировать акцепторные примеси и дефекты в нитридах третьей группы, этот эффект наблюдается вплоть до температур отжига 800 °C.

Однако отжиг при температурах более 900 °C приводит к удалению водорода из нитрида галлия [44] *p*-типа проводимости и слегка понижает концентрацию водорода в нитриде галлия *n*-типа проводимости. Водород имеет низкую растворимость в структурах *n*-типа проводимости. Водород легко диффундирует в нитрид галлия *p*-типа проводимости, но диффузия водорода в нитрид галлия *n*-типа проводимости или сквозь структуры типа GaN:Mg/GaN:Si значительно ослаблена. Эти явления объясняются тем, что водород отрицательно заряжен в GaN *n*-типа и положительно заряжен в GaN *p*-типа или высокоомном GaN [43].

Аналогично в пассивирующем нитриде кремния водород быстро удаляется при высокотемпературных отжигах, например, показано, что время диффузионного выхода водорода из слоя нитрида кремния толщиной 100 nm при температуре 800 K составляет $2.1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ [45].

Перечисленное позволяет предположить, что водород, содержащийся в epitаксиальном нитриде галлия, активно взаимодействует с электрически активными центрами в epitаксиальной структуре и пассивирующем нитриде кремния, в значительной степени влияя на транспорт электронов в транзисторных структурах. Однако при термических воздействиях на epitаксиальные структуры в процессе изготовления транзисторных структур (например, при вжигании контактов) концентрация водорода как в объеме epitаксиальных структур, так и в пассивирующем нитриде кремния (и на границе диэлектрик–полупроводник) заметно уменьшается. Это может приводить к изменению параметров транзисторных структур, уменьшению тока насыщения, выходной мощности, увеличению утечек и т. п.

Известны способы введения водорода в объем гетероструктур GaN/AlGaN с использованием радиочастотной плазмы дейтерия [30]. Подложка при температуре 260 °C обрабатывалась в дейтериевой плазме в течении 10 min. В этом случае на глубинах 1–100 nm достигалась концентрация дейтерия 10^{17} – 10^{21} cm $^{-3}$.

Это приводило к повышению ряда параметров транзисторных структур, таких как ток насыщения, ток утечки и соответственно динамических характеристик на 10%–30%. Вдобавок можно отметить, что обработка в водороде может способствовать выводу радикалов галогенов из объема нитридов третьей группы после традиционных технологических процессов изготовления полупроводниковых структур [46].

В настоящей работе авторы анализируют эффективность осаждения на поверхность транзисторной структуры пассивирующего нитрида кремния и анализируют степень влияния обработки в водородной плазме в конце технологического процесса на электрические параметры транзисторных структур.

1. Экспериментальная установка

Гидрогенизация AlGaN/GaN-транзисторных структур и пассивация плазмохимическим нитридом кремния $\text{H}_x\text{Si}_y\text{N}_z\text{H}_w$ проводились на установке с генерацией сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Установка лабораторной сборки позволяет изменять и поддерживать поглощаемую СВЧ мощность и позволяет управлять энергией ионов N_2^+ , N^+ , Si^+ , H_2^+ и протонов H^+ . Энергии ионов и протонов, атакующих поверхность образца, фиксировались отрицательным потенциалом смещения U_b , который изменялся от величины плавающего потенциала V_{flo} [47] до -160 V.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд генерировался путем поглощения в ЭЦР-камере (диаметр 15 см, длина 16 см) микроволновой (СВЧ) мощности магнетрона. Излучаемая магнетронной лампой СВЧ мощность W_{in} на частоте $f = 2.45$ GHz может стабильно поддерживаться генератором в диапазоне $W_{in} = 50$ – 1000 W. Поток СВЧ энергии поступает в объем ЭЦР-камеры через СВЧ тракт на основе волноводов с прямоугольным профилем. Для управления энергией положительно заряженных ионов к держателю подложки (Si, SiC или Al_2O_3 пластина с транзисторными структурами) прикладывается ВЧ напряжение с управляемой амплитудой. Установка может функционировать как для пассивации, так и для гидрогенизации AlGaN/GaN-транзисторных структур. Газовое кольцо используется для организации однородного распределения по поверхности подложки потока молекул активного газа (SiH_4 или H_2). Для пассивации используется газовая смесь ($1 \cdot \text{SiH}_4 + 3 \cdot \text{Ar}$) и коаксиальное натекание N_2 в ЭЦР-камеру. Для процесса гидрогенизации используется H_2 и коаксиальное натекание Ar в ЭЦР-камеру. Коаксиально-симметричное натекание N_2 либо Ar организовано от периферии цилиндра на входе в ЭЦР-камеру, так что потоки молекул „скользят“ вдоль поверхности кварцевого окна к его центру.

Оптимальное распределение индукции магнитного поля в объеме ЭЦР-камеры достигается путем передвижения магнитных катушек параллельно оси камеры вдоль направляющих стержней. Таким образом, магнитное поле $B_r = 875$ G, необходимое для поддержания условия ЭЦР, достигается на удалении 40 mm от кварцевого окна (рис. 1) и далее остается неизменным на участке 30 mm вдоль оси ЭЦР-камеры.

Для гидрогенизации транзисторных структур плазма поддерживалась в смеси водорода и аргона. Аргон на-

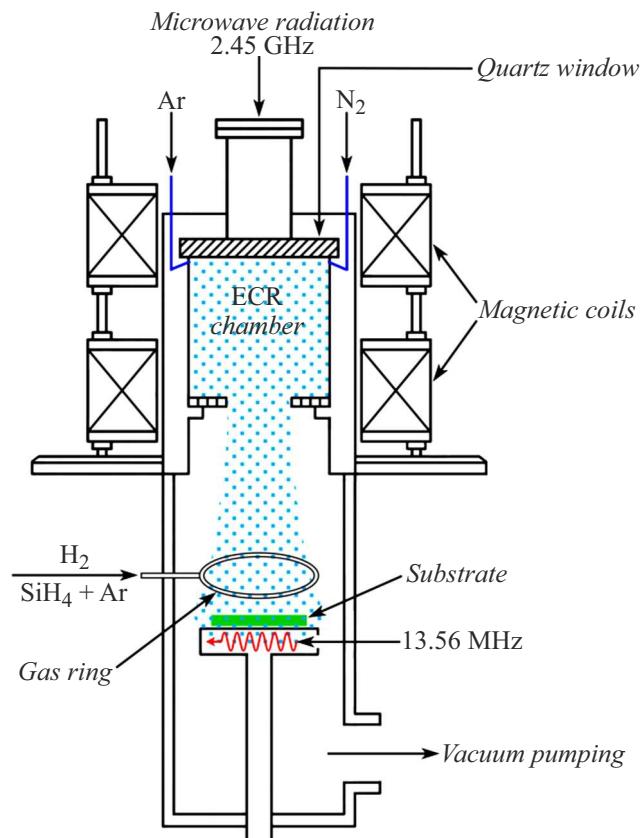


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с генерацией плазменного разряда в условиях ЭЦР: частота СВЧ излучения $f = 2.45$ GHz, резонансное магнитное поле $B_r = 875$ G. Поток СВЧ энергии поступает в объем ЭЦР-камеры (диаметр $\varnothing = 15$ см, длина $L = 16$ см) через СВЧ тракт на основе волноводов с прямоугольным профилем. Для управления энергией положительно заряженных ионов к держателю подложки (Si, SiC или Al_2O_3 пластина с транзисторными структурами) прикладывается ВЧ напряжение с управляемой амплитудой. Установка может функционировать как для пассивации, так и для гидрогенизации AlGaN/GaN-транзисторных структур. Газовое кольцо используется для организации однородного распределения по поверхности подложки потока молекул активного газа (SiH_4 или H_2). Для пассивации используется газовая смесь ($1 \cdot \text{SiH}_4 + 3 \cdot \text{Ar}$) и коаксиальное натекание N_2 в ЭЦР-камеру. Для процесса гидрогенизации используется H_2 и коаксиальное натекание Ar в ЭЦР-камеру. Коаксиально-симметричное натекание N_2 либо Ar организовано от периферии цилиндра на входе в ЭЦР-камеру, так что потоки молекул „скользят“ вдоль поверхности кварцевого окна к его центру.

пускался коаксиально-симметрично от периферии кварцевого окна на входе в ЭЦР-камеру. Для процесса пассивации Ar заменялся на N_2 (рис. 1). Пластина с AlGaN/GaN-транзисторными структурами устанавливалась в подложкодержатель, расположенный соосно на расстоянии 120 mm от выхода ЭЦР-камеры. Для генерации потенциала смещения U_b к подложкодержателю относительно корпуса ЭЦР-плазменной установки прикладывалось ВЧ напряжение частотой 13.56 MHz с управляемой амплитудой.

Оптимальные условия обработки ЭЦР-плазмой подбирались путем варьирования температуры подложки $T = 40^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}$, микроволновой мощности $W = 50 - 400\text{ W}$, давления $P = 0.1 - 4\text{ mTorr}$ и соотношения $R = 0.2 - 1.0$ потоков H_2/Ar . Для цели пассивации оптимальное соотношение потоков SiH_4/N_2 поддерживалось равным 1.05.

Вдали от области ЭЦР и стенок камеры в плазме $\{e, \text{N}_2^+\}$ энергия электронов $kT_e \approx 5\text{ eV}$. В любом направлении поток электронов в ≈ 1000 раз превышает поток ионов. Это обусловлено отношением масс $(M_i/m_e \approx 51\,000)$ и отношением температур $(T_e/T_i \approx 20)$ электронной и ионной компонент нейтральной плазмы. Изолированная подложка, помещенная в область плазмы, получит отрицательный заряд, необходимый для выравнивания потоков электронов и ионов на ее поверхность. Относительно нейтральной плазмы подложка зарядится отрицательным потенциалом. Такой потенциал в физике плазмы называется плавающим потенциалом V_{flo} . В плазме $\{e, \text{N}_2^+\}$ величина $V_{flo} \approx -5.155 \cdot kT_e \approx -26\text{ V}$ [47].

Физическая картина модифицируется, если на подложку относительно стенок камеры подать ВЧ напряжение, как это показано на рис. 1. Под действием импульса силы от ВЧ поля смещение облака электронного газа в M_i/m_e раз превышает смещение массива ионов. В каждом периоде колебаний плазмы подложка „окунается“ в электронное облако. Вблизи поверхности подложки произойдет поляризация плазмы. В результате такой поляризации слой отрицательного заряда сместится на поверхность подложки, а слой с положительным зарядом будет распределен на некотором расстоянии от ее поверхности. Относительно нейтральной плазмы подложка получает отрицательный потенциал U_b , величина которого определяется амплитудой ВЧ поля. Положительные ионы в потоке частиц, атакующих поверхность подложки, при прохождении области поляризации плазмы, приобретают энергию, равную eU_b . Более детальное описание выпрямляющего действия приэлектродной плазмы на ВЧ поле изложено в книге Ю.П. Райзера [48].

Ввиду высокой степени ионизации (0.001–0.1) в условиях ЭЦР-плазмы обеспечиваются достаточные потоки активных частиц для поддержания процессов нанесения на подложку однородной пленки [49] при давлениях в камере $(0.1 - 10) \cdot 10^{-3}\text{ Torr}$.

2. Результаты исследований

2.1. Исследование плазмохимического нитрида кремния $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$

В связи с известными преимуществами ЭЦР-плазмы [49, 50] процесс осаждения слоя нитрида кремния проводился в ЭЦР-плазменной установке. Таким образом, для устранения возможного дефектообразования, мы стремились понизить энергию ионов и одновременно

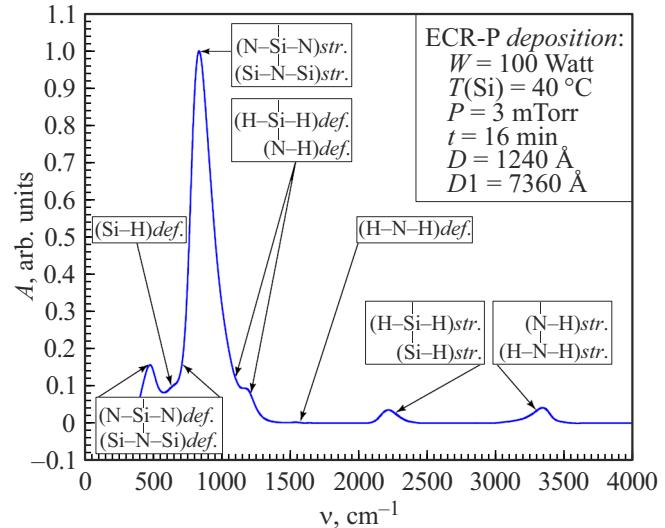


Рис. 2. FTIR-спектр плазмохимического нитрида кремния $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ ($x + r + z + y = 100$). Спектр представлен в нормировке основного пика $\nu_o = 838\text{ cm}^{-1}$ на оптическую плотность $A = 1$ (падение интенсивности проходящего ИК излучения в 10 раз). Оптической плотности $A = 1$ соответствует толщина слоя $D_1 = 7360\text{ \AA}$.

стремились повысить плотность электронного газа (степень ионизации плазменного разряда).

Оптимизация процесса осаждения обусловлена существенным отличием химической формулы Si_3N_4 от атомарного состава реального материала $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ -слоя, который в микроэлектронной технологии принято называть „нитрид кремния“. Молекулярная формула $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ для нитрида кремния введена в публикации [45]. В этой формуле x, r, z, y — атомарные проценты: $x + r + z + y = 100\%$; $x = C(\text{Si}-\text{H})$, $r = C(\text{Si})$, $z = C(\text{N})$, $y = C(\text{N}-\text{H})$. Проценты атомов водорода x и y зависят от процесса и температуры нанесения слоя „нитрида кремния“. Минимальное количество $x + y = 5\%$ может быть достигнуто при высокотемпературном ($T > 1200\text{ K}$) пиролитическом осаждении слоя. При низкотемпературном ($T < 600\text{ K}$) плазмохимическом осаждении слоя суммарный процент атомов водорода может достичь 38 % [51].

Таким образом, слой „нитрид кремния“ $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ является полимероподобным материалом и изначально содержит химически связанные ($\equiv\text{Si}-\text{H}$, $=\text{N}-\text{H}$) атомы водорода. Пассивацию AlGaN HEMTs нитридом кремния $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ проводили в условиях, обеспечивающих примерно равные концентрации ($x \approx y = 14\%$) химических связей $\text{Si}-\text{H}$ и $\text{N}-\text{H}$.

Слои нитрида кремния $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ (1000 \AA) осаждали из азота и моносилана (SiH_4), разбавленного аргоном (1:3). Температура подложки 200°C , соотношение потоков SiH_4/N_2 варьировалось в диапазоне (0.75–1.25), давление 3 mTorr, поглощенная СВЧ мощность ($W_{in} - W_{ref}$) = 200 W.

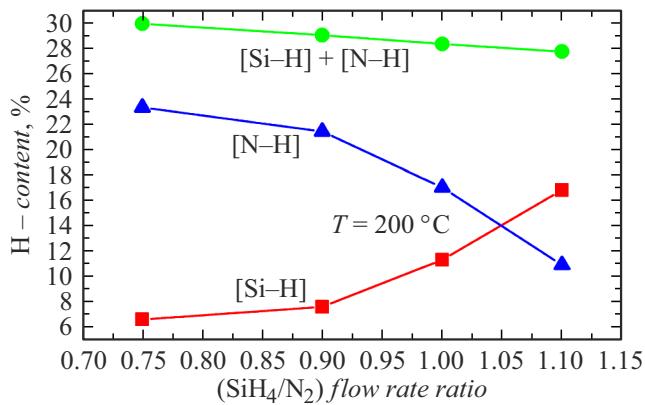


Рис. 3. Содержание водорода в слоях плазмохимического нитрида кремния $H_xSi_rN_zH_y$ ($x + r + z + y = 100$) в зависимости от соотношения потоков SiH_4/N_2 .

С целью исследования свойств нитрида кремния, слои $H_xSi_rN_zH_y$ осаждались на пластины высокоомного Si (111) (p -тип, $10\ \Omega\cdot cm$). Показатель преломления нитрида кремния варьировался в диапазоне 1.96–2.03 путем изменения соотношения потоков SiH_4/N_2 (0.9–1.1). На рис. 2 показан FTIR (инфракрасная спектрометрия с преобразованием Фурье) спектр слоя нитрида кремния $H_xSi_rN_zH_y$ в нормировке основного пика $\nu_o = 838\ cm^{-1}$ на оптическую плотность $A = 1$. Количество включенного водорода и вид химической связи определялись по пикам поглощения мод валентных колебаний $Si-H$ при $2180\ cm^{-1}$ и $N-H$ при $3340\ cm^{-1}$.

Для сканирования FTIR-спектров использовался Фурье-ИК спектрометр исследовательского класса Bruker VERTEX 27 V. Все спектры записывались с разрешением $\Delta\nu = 4\ cm^{-1}$ в области волновых чисел от 370 до $6370\ cm^{-1}$ с накоплением и автоматическим усреднением 625 сканов. В программе Grams/386 (Thermo Fisher Scientific corporation) от суммарного ИК спектра $\{H_xSi_rN_zH_y + Si(111)\}$ вычитался ИК спектр высокоомного кремния $\{Si(111)\}$. Далее в программе Grams/386 разностный ИК спектр $\{H_xSi_rN_zH_y\}$ приводился к виду ИКСАН (Инфракрасный спектр абсолютный нормализованный), как на рис. 2. Именно ИК спектр, приведенный к виду ИКСАН, является пригодным для анализа и математической обработки. Процедура приведения разностного ИК спектра $\{H_xSi_rN_zH_y\}$ к виду ИКСАН детально описана в нашей работе [51].

В работе [51] мы разработали математическое обеспечение, позволяющее использовать данные ИК-фурье спектрометрии для расчета процентного атомарного состава (x, r, z, y) в слоях нитрида кремния $H_xSi_rN_zH_y$ субмикронной толщины 500–3000 Å. Содержание водорода в слоях $H_xSi_rN_zH_y$ в зависимости от соотношения потоков SiH_4/N_2 показано на рис. 3. При температуре осаждения $200\ ^\circ C$ для процентного содержания химических связей $Si-H$ и $N-H$ наблюдались резкие изменения при небольших отклонениях отношения

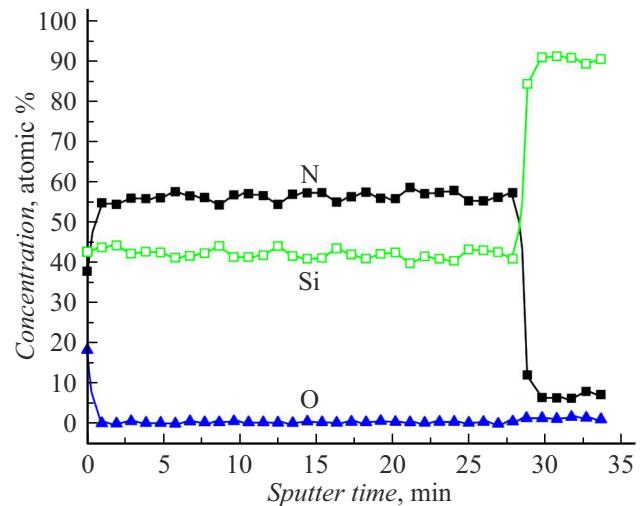


Рис. 4. Распределение концентраций O, Si, N по толщине слоя плазмохимического нитрида кремния $H_xSi_rN_zH_y$ ($x + r + z + y = 100$), измеренное с помощью SIMS.

(SiH_4/N_2) около значения, равного 1.05. При этом общее содержание водорода оставалось почти постоянным (рис. 3). При значении $(SiH_4/N_2) = 1.05$ и температуре осаждения $200\ ^\circ C$ достигается равенство содержания химических связей $Si-H$ и $N-H$ в $H_xSi_rN_zH_y$ так, что $x = y \approx 14\%$ и отношение $r/z = 3/4$, как это имеет место в стехиометрическом нитриде кремния Si_3N_4 . Это означает, что пара атомов (H, H) химически встраивается в каждую оборванную связь $(Si-\cdots-N) \Rightarrow (H, H) + (Si-\cdots-N) = Si-H + N-H$. По всей видимости, в структуре нитрида кремния $H_xSi_rN_zH_y$ при $x = y$ достигается локальный минимум потенциальной энергии.

На рис. 4 представлены результаты измерений атомарных концентраций методом SIMS (масс-спектрометрия вторичных ионов). Измеренные с помощью метода SIMS содержания атомов Si, N, O по глубине слоя нитрида кремния были почти постоянными. SIMS-спектры были получены на вторично-ионном масс-спектрометре TOFSIMS-5 (IONTOF, Германия) с предельной чувствительностью $10^{14}\ atoms/cm^3$. Измерения проводились при давлении $5 \cdot 10^{-5}\ Pa$ в динамическом режиме. Скорость распыления нитрида кремния $\approx 50\ \text{\AA}/\text{min}$. Энергия первичных ионов Xe^+ равна 1 keV.

2.2. Пассивация AlGaN HEMTs плазмохимическим нитридом кремния $H_xSi_rN_zH_y$

Транзисторные структуры — это тестовые полевые транзисторы изготовленные на гетероструктуре AlGaN/GaN, выращенной на сапфировой подложке, с омическими контактами Ti/Al/Ni/Au, затвором Ni/Au и пассивированные плазмохимическим нитридом кремния $H_xSi_rN_zH_y$.

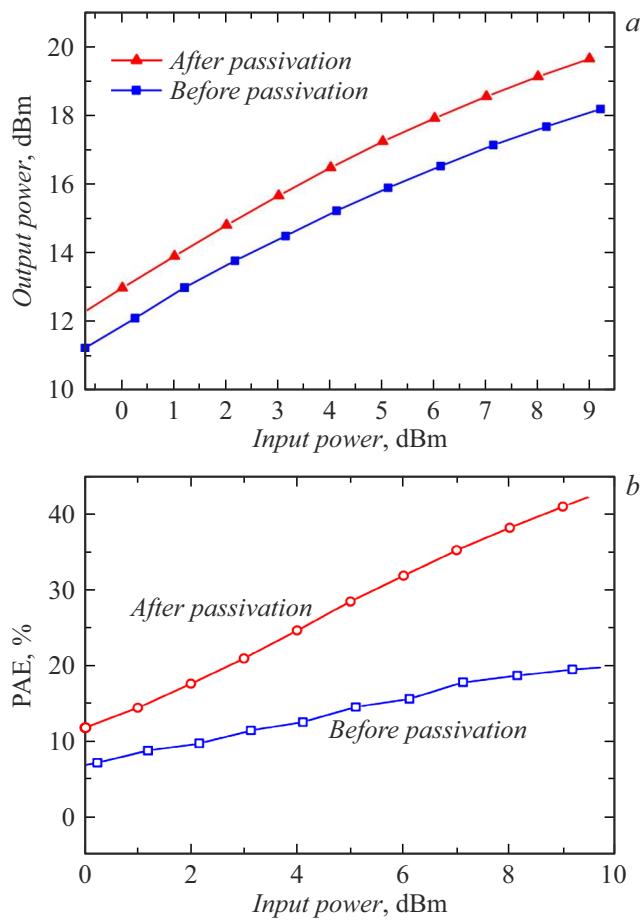


Рис. 5. Выходная мощность (a) и коэффициент полезного действия PAE (b) до и после пассивации структуры AlGaN/GaN HEMT. Измерения проведены на частоте 10 GHz.

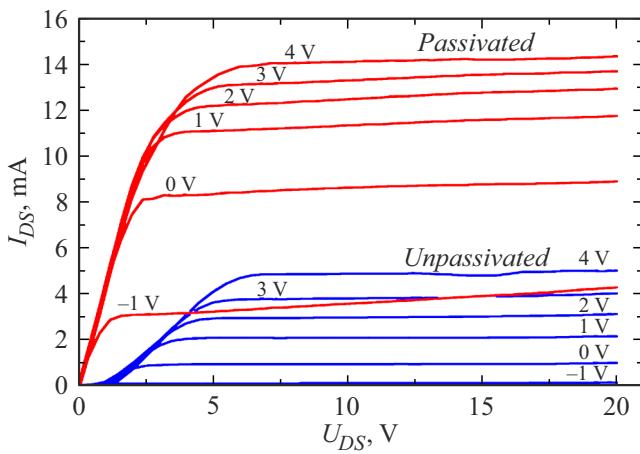


Рис. 6. Вольт-амперные (I - V) характеристики AlGaN/GaN-транзисторов до и после пассивации нитридом кремния $H_xSi_rN_zH_y$. Размеры затвора $2 \times 50 \times 0.3 \mu\text{m}$. Максимальное напряжение на затворе $V_g = +4 \text{ V}$. Характеристики записаны с шагом $V_g = 1 \text{ V}$.

Измерения токов насыщения, выходной мощности и КПД до и после пассивации были выполнены для

нелегированного AlGaN/GaN на транзисторных структурах с затвором размерами $2 \times 37.5 \times 0.3 \mu\text{m}$. Измерения были выполнены на частоте 10 GHz ($V_{ds} = 15 \text{ V}$, $V_{gs} = -3.8 \text{ V}$). Было получено увеличение выходной мощности до 40 %. На рис. 5 показаны выходная мощность и коэффициент полезного действия PAE (Power-Added Efficiency) до и после пассивации.

При этом значительно увеличились, как это можно видеть на рис. 6, крутизна вольт-амперной характеристики и ток насыщения. После пассивации наблюдается увеличение PAE с 20 % до 41 %. Из этих измерений ясно, что пассивация сильно уменьшает истощение области канала проводимости под поверхностью полупроводника затвор–сток, что приводит к более выраженной возможности для модуляции активного канала.

2.3. Влияние обработки в водородной плазме на токи насыщения и на токи утечки транзисторных структур

Образцы транзисторных структур аналогичной геометрии обрабатывались в водородной ($H_2 + Ar$) ЭЦР-плазме при давлении 2 mTorr, отношении потоков $F(H_2)/F(Ar) = 1$, поглощенной СВЧ мощности ($W_{in} - W_{ref} = 300 \text{ W}$), потенциале самосмещения $U_b = -120 \text{ V}$ и при различных временах экспонирования. Температура держателя подложки 200 °C.

Группа пластин с однотипными транзисторными структурами укладывалась на поверхность зеркально полированного столика из нержавеющей стали, к которому прикладывалось ВЧ напряжение с управляемой амплитудой (рис. 1). После пятиминутной обработки в водородной ЭЦР-плазме и остановки процесса, часть пластин извлекалась из реактора. Остальные пластины оставались на поверхности substrate holder для добавления следующей пятиминутной порции обработки. И так далее до достижения 25 min обработки для крайней пары пластин. Такая методика позволила исключить существенный адиабатический разогрев пластины в плазме газового разряда, если ее обрабатывать непрерывно в течение 25 min. При давлении 2 mTorr температура пластины может значительно отличаться от 200 °C ввиду кнудсеновского режима теплопередачи в прослойке газа между пластиной и зеркально полированным столиком. Важным моментом является то, что такой метод позволил добавлять одинаковые пятиминутные порции обработки для последующих экспериментальных точек. Поток протонов, ускоренных потенциалом U_b , трансформируется в поток атомов водорода. Индивидуальная температура каждой пластины является критическим параметром гидрогенизации, поскольку процесс проникновения атомов водорода в глубокие слои ($\approx 100 \text{ nm}$) транзисторной структуры имеет диффузионный характер.

На рис. 7, 8 показано, что оба тока (насыщения и утечки) заметно зависят от времени плазменной обработки. Это может свидетельствовать о том, что водород

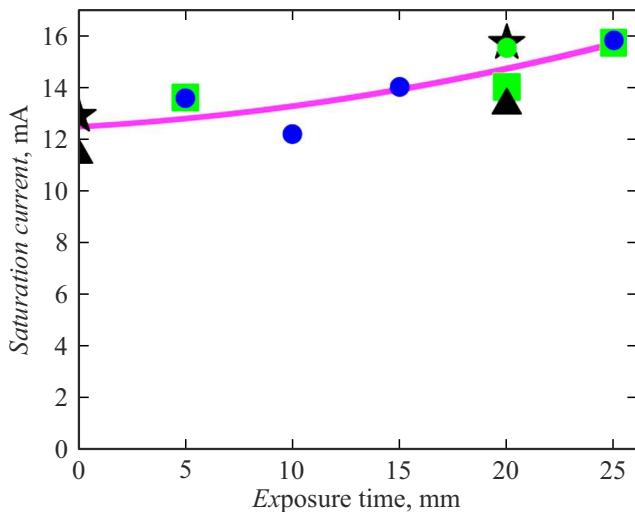


Рис. 7. Зависимость тока насыщения от времени обработки в ЭЦР-водородной плазме AlGaN/GaN-транзисторных структур с размерами затвора $2 \times 50 \times 0.3 \mu\text{m}$, $V_g = +4 \text{ V}$.

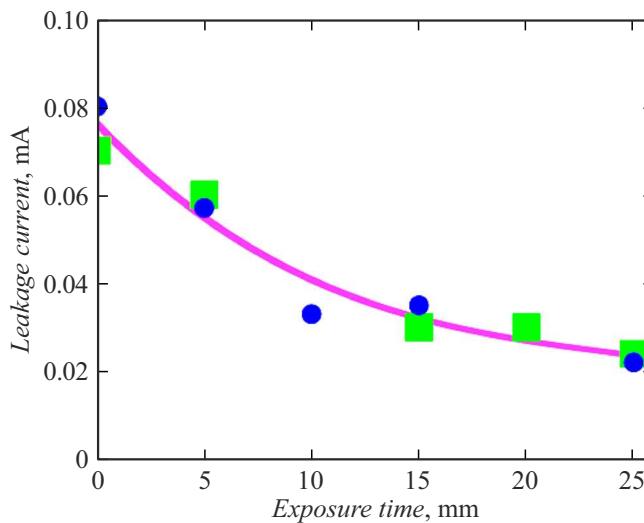


Рис. 8. Зависимость тока утечки от времени обработки в ЭЦР-водородной плазме AlGaN/GaN-транзисторных структур с размерами затвора $2 \times 50 \times 0.3 \mu\text{m}$, $V_g = +4 \text{ V}$.

диффундирует в объем гетероструктуры и пассивирует акцепторы не только на поверхности, но и в объеме полупроводника [21].

Заключение

Эпитаксиальные AlGaN/GaN-структуры после выращивания содержат водород с концентрацией, сопоставимой (или более) с концентрацией доноров или акцепторов.

Во время термических обработок водород может покидать объем эпитаксиальной структуры, снижая кон-

центрацию до уровня существенно ниже концентрации электрически активных центров.

Атомарный водород, локализованный вблизи поверхности эпитаксиальной структуры, по-видимому, может пассивировать ловушечные состояния на поверхности эпитаксиальной структуры, предотвращая туннелирование электронов из области двумерного газа на поверхностные ловушки и изменение плотности двумерного электронного газа.

В то же время при обработке в водородной ЭЦР-плазме водород диффундирует в объем эпитаксиальной структуры, уменьшая концентрацию свободных дырок. И как результат может приводить к повышению тока насыщения, выходной мощности и коэффициента полезного действия транзисторных структур, по крайней мере с нелегированным каналом.

Не очень яркая, но существенная зависимость тока насыщения и токов утечки транзисторов от времени обработки в водородной плазме может свидетельствовать о том, что во время обработки водород диффундирует в объем гетероструктуры и пассивирует акцепторы не только на поверхности, но и в объеме полупроводника.

Наш вывод о том, что насыщение водородом при низких температурах и в конце технологических процедур формирования электронных устройств совпадает с выводами работы [39], что включение кислорода во время роста может быть вредным; оно становится полезным, если вводится в фазе охлаждения или послеростовой термической обработки при значительно более низкой температуре. Может быть это свидетельствует о некоторых общих механизмах связывания водорода и кислорода в присутствии вакансий и дислокаций.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИПТМ РАН: STATE TASK № 075-00295-25-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Shapoval, V. Gurtovoi, A. Kovalchuk, L. Eastman, A. Vertjachih, C. Gaquiere, D. Theron. *Proc. of WOCS DICE-2002 — XXVI Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (Chernogolovka, Russia, 2002), p. VII.7.
- [2] L.F. Eastman. *Proc. of WOCS DICE-2000 — XXIV Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (Aegean Sea, Greece, 2000), p. VIII-7.
- [3] C. Gaquiere, B. Boudart, R. Amokrane, Y. Crosnier, J.C. De jaeger, F. Omnes. *Proc. of WOCS DICE-2000 — XXIV Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits* (Aegean Sea, Greece, 2000), p. VIII-11.

- [4] A.A. Sleptsova, S.V. Chernykh, D.A. Podgorny, I.A. Zhilnikov. Modern Electron. Mater., **6** (2), 71 (2020). <https://doi.org/10.3897/j.moem.6.2.58860>
- [5] X. Wang, S. Huang, Y. Zheng, K. Wei, X. Chen, G. Liu, T. Yuan, W. Luo, L. Pang, H. Jiang, H. Robust. IEEE Electron. Device Lett., **36** (7), 666 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2432039 <https://ieeexplore.ieee.org/document/7105867>
- [6] S. Okada, H. Matsumura. Jpn. J. Appl. Phys., **36** (11R), 7035 (1997). DOI: 10.1143/JJAP.36.7035 <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.36.7035>
- [7] K.N. Tomosh, A.Yu. Pavlov, V.Yu. Pavlov, R.A. Khabibullin, S.S. Arutyunyan, P.P. Maltsev. Semiconductors, **50** (10), 1434 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1063782616100225>
- [8] Manjari Garg, Tejas Rajendra Naik, Ravi Pathak, Valipe Ramgopal Rao, Che-Hao Liao, Kuang-Hui Li, Haiding, Sun, Xiaohang Li, Rajendra Singh. J. Appl. Phys., **124**, 195702 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5049873>
- [9] P. Javorka, J. Bernat, A. Fox, M. Marso, H. Lüth, P. Kordos. Electron. Lett., **39**, 1155 (2003). <https://doi.org/10.1049/el:20030748>
- [10] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, T. Jimbo, Y. Sano. Appl. Phys. Lett., **84**, 613 (2004). <https://doi.org/10.1063/1.1642276>
- [11] D. Xu, K. Chu, J. Diaz, W. Zhu, R. Roy, L.M. Pleasant, K. Nichols, P.-C. Chao, M. Xu, D.Y. Peide. IEEE Electron. Device Lett., **34** (6), 744 (2013). <https://doi.org/10.1109/LED.2013.2255257>
- [12] S. Huang, Q. Jiang, S. Yang, C. Zhou, K.L. Chen. IEEE Electron. Device Lett., **33** (4), 516 (2012). DOI: 10.1109/LED.2012.2185921 <https://ieeexplore.ieee.org/document/6155727>
- [13] Z. Tang, S. Huang, Q. Jiang, S. Liu, C. Liu, K.J. Chen. IEEE Electron Device Lett., **34** (3), 366 (2013). DOI: 10.1109/LED.2012.2236638 <https://ieeexplore.ieee.org/document/6410341>
- [14] Zikri Zulkifli, Norshamsuri Ali, Shaili Falina, Hiroshi Kawarada, Mohamed Fauzi Packer Mohamed, Mohd Syamsul. Key Eng. Mater., **947**, 21 (2023). <https://doi.org/10.4028/p-445y05>
- [15] Sayak Dutta Gupta, Rajarshi Roy Chaudhuri, Mayank Shrivastava. IEEE Transactions on Electron Devices, **68** (11), 5728 (2021). <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3064531>
- [16] Zhi-Yu Lin, Zhi-Bin Chen, Jin-Cheng Zhang, Sheng-Rui Xu, Teng Jiang, Jun Luo, Li-Xin Guo, Yue Hao. Chin. Phys. Lett., **35** (2), 026104 (2018). <https://cpl.iphy.ac.cn/article/doi/10.1088/0256-307X/35/2/026104>
- [17] A. Pandey, B.S. Yadav, D.V.S. Rao, D. Kaur, A.K. Kapoor. Appl. Phys. A., **122**, 614 (2016). DOI: 10.1007/s00339-016-0143-3 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-016-0143-3>
- [18] P. Kumar, S. Rao, J. Lee, D. Singh, R.K. Singh. J. Solid State Sc. Tech., **2** (1), P1 (2012). DOI: 10.1149/2.009301jss <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.009301jss>
- [19] J. Oila, J. Kiviola, V. Ranki, K. Saarinen, D.C. Look, R.J. Molnar, S.S. Park, S.K. Lee, J.Y. Han. Appl. Phys. Lett., **82**, 3433 (2003). <https://doi.org/10.1063/1.1569414>
- [20] J. Elsner, R. Jones, P.K. Sitch, V.D. Porezag, M. Elstner, Th. Frauenheim, M.I. Heggie, S. Öberg, P.R. Briddon. Phys. Rev. Lett., **79**, 3672 (1997). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.3672>
- [21] U. Jahn, O. Brandt, E. Luna, X. Sun, H. Wang, D.S. Jiang, L.F. Bian, H. Yang. Phys. Rev. B, **81**, 125314 (2010). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.125314>
- [22] J. Cai, F.A. Ponce. Phys. Stat. Sol. A, **192**, 407 (2002). DOI: 10.1002/1521-396X(200208)192:2<407::AID-PSSA407>3.0.CO;2-M [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200208\)192:2<407::AID-PSSA407>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200208)192:2<407::AID-PSSA407>3.0.CO;2-M)
- [23] E. Muller, D. Gerthsen, P. Brückner, E. Scholz, Th. Gruber, A. Waag. Phys. Rev. B, **73**, 245316 (2006). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.245316>
- [24] J. Yu, Z. Hao, L. Li, L. Wang, Y. Luo, J. Wang, Ch. Sun, Y. Han, B. Xiong, H. Li. AIP Adv., **7**, 035321 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4979504>
- [25] K. Qiu, X.H. Li, Z.J. Yin, X.C. Cao, Q.F. Han, C.H. Duan, X.J. Zhou, M. Liu, T.F. Shi, X.D. Luo, Y.Q. Wang. EPL, **82**, 18002 (2008). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/82/18002>
- [26] J.H. You, J.Q. Lu, H.T. Johnson. J. Appl. Phys., **99** (3), 033706 (2006). <https://doi.org/10.1063/1.2168028>
- [27] E.C.H. Kyle, S.W. Kaun, P.G. Burke, F. Wu, Y.R. Wu, J.S. Speck. J. Appl. Phys., **115** (19), 193702 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4874735>
- [28] S. Besendorfer, E. Meissner, A. Lesnik, J. Friedrich, A. Dadgar, T. Erlbacher. J. Appl. Phys., **125** (9), 095704 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5065442>
- [29] M. Tapajna, S.W. Kaun, M.H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U.K. Mishra, J.S. Speck, M. Kuball. Appl. Phys. Lett., **99** (22), 223501 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3663573>
- [30] J. Mimila-Arroyo, E. Morales, A. Lusson, J.M. Laroche, F. Jomard, M. Tessier. Superficies y Vacío, **23** (4), 31 (2010). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94216142007>
- [31] S. Lester, F. Ponce, M. Crawford, D. Steigerwald. Appl. Phys. Lett., **66** (10), 1249 (1995). <https://doi.org/10.1063/1.113252>
- [32] T.D. Moustakas. Phys. Status Solidi A, **210** (1), 169 (2013). <https://doi.org/10.1002/pssa.201200561>
- [33] A. Uedono, K. Tenjinbayashi, T. Tsutsui, Y. Shimahara, H. Miyake, K. Hiramatsu, N. Oshima, R. Suzuki, S. Ishibashi. J. Appl. Phys., **111** (1), 013512 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.3675270>
- [34] K. Saarinen, T. Laine, S. Kuusma, J. Nissilä, P. Hautojärvi, L. Dobrzynski, J.M. Baranowski, K. Pakula, R. Stepniewski, M. Wojdak, A. Wysmolek, T. Suski, M. Leszczynski, I. Grzegory, S. Porowski. Phys. Rev. Lett., **79**, 3030 (1997). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.3030>
- [35] V. Prozheeva, I. Makkonen, H. Li, S. Keller, U.K. Mishra, F. Tuomisto. Phys. Rev. Appl., **13**, 044034 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.044034>
- [36] Keisuke Sagisaka, Oscar Custance, Nobuyuki Ishida, Tomonori Nakamura, Yasuo Koide. Phys. Rev. B, **106**, 115309 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.115309>
- [37] A.F. Wright. J. Appl. Phys., **90** (3), 1164 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1383980>
- [38] J.P. Perdew, A. Zunger. Phys. Rev. B, **23**, 5048 (1981). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.23.5048>
- [39] Sayre Christenson, Weiyu Xie, Yi-Yang Sun, S.B. Zhang. Phys. Rev. B, **95**, 121201 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.95.121201 <https://link.aps.org/accepted/10.1103/PhysRevB.95.121201>
- [40] Su-Huai Wie, A. Zunger. Appl. Phys. Lett., **69** (18), 2719 (1996). <https://doi.org/10.1063/1.117689>
- [41] J. Neugebauer, Ch.G. van de Walle. Appl. Phys. Lett., **69** (4), 503 (1996). <https://doi.org/10.1063/1.117767>

- [42] C.H. Seager, S.M. Myers, A.F. Wright, D.D. Koleske, A.A. Allerman. *J. Appl. Phys.*, **92** (12), 7246 (2002). <https://doi.org/10.1063/1.1520719>
- [43] R. Czernecki, E. Grzanka, R. Jakieła, S. Grzanka. *J. Alloys Compounds*, **747**, 354 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.270>
- [44] R. Jakieła, A. Barcz. arXiv: Materials Science, Preprint (2020). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.04144>
- [45] A. Kovalchuk, G. Beshkov, S. Shapoval. *J. Res. Phys.*, **31** (1), 37 (2007). <https://www.researchgate.net/publication/277125029>
- [46] S. Chen, Y. Lu, R. Kometani, K. Ishikawa, H. Kondo, Y. Tokuda, Makoto Sekine, M. Hori. *AIP Advances*, **2** (2), 022149 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4729448>
- [47] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, Физматлит, М., 1992), гл. **8**, § 5, п. 5.3, с. 199. <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
- [48] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, Физматлит, М., 1992), гл. **15**, § 4, п. 4.3, с. 479. <https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1-rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html> (in Russian)
- [49] S.Y. Shapoval, V.T. Petrashov, O.A. Popov, M.D. Yoder Jr., P.D. Maciel, C.K.C. Lok. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **9** (6), 3071 (1991). <https://doi.org/10.1116/1.577175>
- [50] E. Polushkin, S. Nefed'ev, A. Kovalchuk, O. Soltanovich, S. Shapoval. *Rus. Microelectronics*, **52** (3), 195 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063739723700373>
- [51] A.V. Kovalchuk, S.U. Shapoval, S.S. Lebedev, S.A. Steblin, A.V. Volosov, N.I. Kargin. *Vestnik Natsionalnogo issledovatelskogo jadernogo universiteta „MIFI“*, in Russian, **3** (2), 189 (2014). DOI: 10.1134/S2304487-X14020126 <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.1134/S2304487X14020126>