

УДК 533.9.07

Т.И. Данилина, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик

## Ионно-плазменные методы получения наноструктур

Приведены современные результаты деятельности и научно-технические разработки научной школы ТУСУРа, связанной с методами получения наноструктур по технологии ионно-плазменного осаждения и зародившейся под руководством Г.А. Воробьева в 1970 г. Приводятся результаты о выполненных исследованиях в этой области, а также сведения об их внедрении в производство изделий микроэлектроники в виде нанослоев различного назначения.

**Ключевые слова:** ионно-плазменное распыление, магнетронная распылительная система, пенниговская распылительная система, диэлектрические, резистивные и проводящие наноструктуры.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-40-45

В микро- и наноэлектронике для разработки современных интегральных схем на кремнии, монолитных схем на арсениде галлия, светоизлучающих диодов на гетероструктурах, различных датчиков давления, состава газов, мембран с нанопорами требуются разнообразные проводящие, резистивные, диэлектрические материалы в виде нанослоев.

Наиболее востребованными методами вакуумного нанесения покрытий на различного рода поверхности являются термическое испарение, электронно-лучевое испарение и различные виды ионно-плазменного распыления. При этом как раз методы ионно-плазменного распыления позволяют при варьировании различных технологических параметров в очень широких пределах проводить модификацию получаемых покрытий. Это обусловило очень стремительное развитие данного метода вакуумного нанесения нанослоев из различных материалов при изготовлении приборов микро- и наноэлектроники.

На кафедре физической электроники (ФЭ) ТУСУРа ведутся многолетние разработки устройств

для ионно-плазменного осаждения нанослоев, отработана технология их получения для различных областей применения. Инициатором и руководителем работ был Г.А. Воробьев начиная с 1970 и по 1990 г. В развитие этого направления внесли большой вклад П.Е. Троян, Т.И. Данилина, В.А. Веденников, К.И. Смирнова, Л.Р. Битнер, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик.

На кафедре ФЭ разработаны устройства ионно-плазменного распыления (ИПР) в скрещенных электрических и магнитных полях на основе пенниговского разряда и магнетронного разряда (магнетронные распылительные системы МРС). С использованием этих устройств создавались технологии получения нанослоев на основе проводящих пленок Mo, Ta, W-Re, силицидов металлов, диэлектрических пленок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и других пленок с более сложным составом.

Схемы ионно-плазменных устройств для напыления пленок показаны на рис. 1.

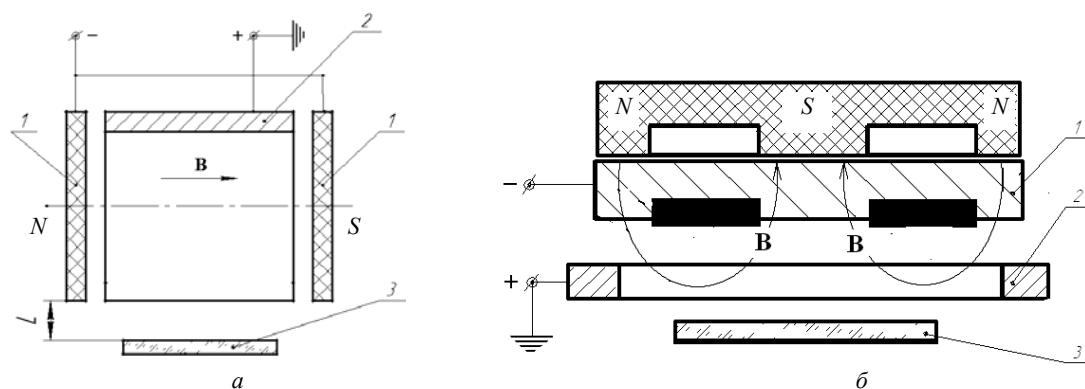


Рис. 1. Схемы расположения электродов для устройства на основе пенниговского разряда (a) и для магнетронной распылительной системы (б): 1 – катод-мишень; 2 – анод; 3 – подложка

В устройстве на основе пенниговского разряда плазма поддерживается между двумя катодами 1 и анодом 2 (рис. 1, a). Система находится в магнитном поле, перпендикулярном плоскости катодов. За счет скрещенных электрических и магнитных полей электроны движутся по циклоидальным траекториям и одновременно совершают гармонические колебания между катодами. Это обеспечивает высокую плотность плазмы при сравнительно низких разряд-

ных напряжениях и давлении рабочего газа. Для получения пленок распыляется материал мишней, размещенных на катодах. Распыленный материал с обоих катодов поступает через открытую часть анода на подложку 3, которая вынесена из разряда на расстояние  $L$  и расположена на изолирующем держателе. При выносе подложки из разряда и при наличии параллельного плоскости подложки магнитного поля уменьшаются ее электронно-ионная бом-

бардировка и нагрев за счет излучения плазмы [1]. Эти устройства позволяют осаждать диэлектрические пленки с разными составами, прозрачные проводящие слои ИТО, омические контакты на гетероструктуры для светодиодов в условиях ограниченного воздействия плазмы на подложку. Другое достоинство разработанного устройства заключается в возможности получения пленок из магнитных материалов, так как в этом случае размещение распыленного материала на катоде в магнитном поле пенниговского разряда способствует эффективному распылению.

В магнетронных распылительных системах (МРС) вблизи катода образуется плазма тлеющего разряда достаточно высокой плотности за счет наложения магнитного поля определенной формы на электрическое поле, направленное от катода 1 к аноду 2 (рис. 1, б). Форма области плотной плазмы определяет конфигурацию зоны распыления на мишени в виде канавки. Эффективность использования материала плоской мишени не превышает 50%. Это уменьшает скорость осаждения пленок и их равномерность по толщине. Магнетронным распылением можно напылять все проводящие материалы, кроме магнитных. При распылении диэлектрических мишеней напыление диэлектрических пленок возможно при условии, если на магнетрон подается высокочастотное напряжение или реализуется реактивное распыление.

Основным недостатком всех устройств ИПР является негативное воздействие плазмы на пленки во время осаждения. Поэтому представлялось целесообразным исследовать механизм влияния электронно-ионной бомбардировки на рост и свойства пленок при различной степени воздействия плазмы [2]. Воздействие электронно-ионной бомбардировки изучалось на примере формирования пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при распылении кремниевых мишеней в пенниговском разряде в среде  $\text{Ar} + \text{N}_2$  (реактивное распыление). Степень электронно-ионной бомбардировки определяется энергией заряженных частиц, падающих на подложку, и их количеством. Концентрация частиц и доза облучения снижаются при удалении подложки из разряда. При расстоянии  $L = (10-20)$  мм (рис. 1, а) величина плавающего потенциала составила 90 В, а средняя энергия электронов 20 эВ. Следует особо отметить, что увеличение напряженности магнитного поля в центре камеры со 100 до 350 В/м приводит к снижению электронного тока на подложку в 4–5 раз.

Влияние электронно-ионной бомбардировки изучалось по характеристикам МДП-структур  $\text{Si}-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Al}$ . Из вольт-фарадных характеристик следует, что увеличение интенсивности электронной бомбардировки (подсоединение подложки к аноду) приводит к появлению на границе раздела большого положительного заряда и к увеличению плотности поверхностных состояний. С этой точки зрения электронно-ионную бомбардировку следует уменьшать, особенно при осаждении пленок на гетероструктуры [2, 3].

В целях совершенствования технологии получения тонких пленок реактивным катодным распылением был исследован механизм распыления и роста диэлектрических слоев на примере распыления мишеней из кремния и алюминия в среде кислорода и азота. Для определения места протекания реакции образования соединений проведено исследование состава частиц, поступающих на подложку с помощью модифицированного масс-анализатора и оптической спектроскопии [4].

При изучении состава распыленных частиц как в нейтральном, так и ионизированном виде установлено наличие атомов и ионов материалов катодов: Al и Si. Присутствие соединения установлено только при распылении Si в кислороде. Большая разница в концентрациях атомов Si в азоте и кислороде также позволяет предположить, что наряду с атомами Si в кислороде распыляются двухатомные молекулы  $\text{SiO}$ . Следовательно, образование соединений  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  происходит на подложке, куда поступают атомы и ионы кремния или алюминия, а также молекулы газа. В случае распыления кремниевых катодов в атмосфере кислорода с катодов распыляется как Si, так и  $\text{SiO}$ . Доокисление до  $\text{SiO}_2$  также происходит на подложке.

Свойства диэлектрических пленок, полученных в пенниговском разряде, зависят от скорости осаждения, состава рабочего газа и температуры подложки [5, 6]. Для пленок нитрида кремния установлено, что увеличение концентрации аргона в смеси аргон с азотом приводит к увеличению скорости осаждения  $V_{\text{ос}}$ , однако при его содержании в смеси более 30% ухудшаются диэлектрические свойства пленок. Увеличение  $V_{\text{ос}}$  до 10 нм/мин и температуры подложки до 300 °C приводит к возрастанию  $\epsilon$  до 6, электрической прочности до  $3 \cdot 10^6$  В/см, показателя преломления до 1,9, что при одновременном снижении  $t_{\text{gb}}$  и скорости травления указывает на уплотнение пленок и приближение их состава к стехиометрическому нитриду кремния. Подобные зависимости были получены и для других пленок, в частности для  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ . Значительное увеличение скорости осаждения приводит к ухудшению свойств диэлектрических пленок: для  $\text{SiO}_2$  – при скоростях более 35 нм/мин, для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – свыше 10 нм/мин. Пленки нитридов более чувствительны к параметрам осаждения, чем окисные пленки.

Проведенные исследования позволили определить технологические параметры для получения качественных диэлектрических пленок: скорость осаждения, температуру подложки и давление газа. Усредненные параметры для ряда диэлектрических пленок, осажденных в выбранных режимах, приведены в таблице.

Сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе данными показывает, что пленки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ , полученные с помощью пенниговского разряда в магнитном поле, имеют такие же или превосходят свойства аналогичных пленок, полученных другими методами.

## Параметры МДМ-структур

Система	Параметры						
	<i>d</i> , нм	$\epsilon$	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{\text{пр}}$ , МВ/см	$\rho$ , Ом·см	<i>n</i>	$C_{\text{уд}}$ , мкФ/см <sup>2</sup> при 15 В
Al–SiO <sub>2</sub> –Al	140	3,9	0,001	4	$10^{15}$	1,46	0,028
Al–Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> –Al	50	7	0,004	4–6	$2 \cdot 10^{15}$	1,9	0,07
Al–AlN–Al	300	8,5	0,003	1			0,016
Al–MgO–Al	150	8	0,007	4			0,057
Al–TiO <sub>2</sub> –Al	170	70	0,03	0,35			0,043

Для МДМ-структур с малыми потерями необходимо отдать предпочтение пленкам SiO<sub>2</sub> ( $\operatorname{tg} \delta \approx 0,001$ ). Наибольшую электрическую прочность имели структуры Al–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–Al до  $10^7$  В/см (в среднем  $5 \cdot 10^6$  В/см) по первому пробою. Пленки TiO<sub>2</sub>, отличающиеся низкой  $E_{\text{пр}}$ , имели к тому же плохую воспроизводимость, что отмечалось также в других работах. Пленки SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN и TiO<sub>2</sub>, полученные в пенниговском разряде, успешно используются в производстве интегральных схем и других изделий микро- и наноэлектроники. Исследования проведены в связи с выполнением гранта РФФИ по проекту № 09-09-99072.

Дальнейшие эксперименты показали, что характеристики МДП-структур на кремниевых подложках существенно зависят от температуры подложки и степени электронно-ионной бомбардировки растущей пленки нитрида кремния. Так, минимальная плотность поверхностных состояний была равна  $2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> эВ<sup>-1</sup>, в то время как для термических окислов это значение порядка  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> эВ<sup>-1</sup>.

Поэтому пленки нитрида кремния, напыленные методом реактивного напыления, рекомендуется применять для стабилизации границы раздела GaAs–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и в качестве защитной маски при отжиге ионно-лигированных слоев на GaAs. Такая герметизация GaAs позволила достичь коэффициента использования примеси 70–80%. В МДП-структурных GaAs–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> напряжение плоских зон равно (4–5) В, гистерезис вольт-фарадной характеристики в точке, соответствующей нулевому поверхностному потенциалу, составляет не более 1 В.

С учетом полученных результатов исследований были разработаны технологии изготовленияnanoструктур для различных областей применения: высокотемпературные тензорезисторы на основе пленок W–Re, композиционные пленки силицидов на основе W–Re–Si, Mo–Si прозрачные проводящие пленки на основе ITO для светодиодов, многослойные оптические покрытия на основе слоев SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>, высокотемпературная изоляция слоев на металлических подложках для тензодатчиков.

Разработка и внедрение высокотемпературных тензодатчиков для авиационной промышленности потребовали разработки высокотемпературных тензорезисторов (более 200 °C) с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) (порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  град<sup>-1</sup>) и термостабильных изоляционных слоев.

Для получения стабильных высокотемпературных тензорезисторов наибольший интерес представляли пленки, полученные путем распыления

мишени из сплава W–Re в пенниговском разряде [7]. Исследования показали, что эти резисторы стабильны при термоциклировании от комнатной температуры до 523 К и имеют ТКС  $8 \cdot 10^{-5}$  град<sup>-1</sup> для пленок W–Re, а для пленок W ТКС превышает  $4 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>. Для пленок W–Re была исследована температурная и временная зависимости относительного изменения сопротивления  $\Delta R/R$  и ТКС. Величина  $\Delta R/R$  с увеличением температуры до 773 К растет, но не превышает 2%, поэтому ТКС менее  $1 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup> и слабо зависит от температуры. При старении резисторов при комнатной температуре на воздухе в течение 1000 ч сопротивление изменяется на (1–3)%, в основном за первые 100 ч. Отжиг резисторов при температуре 900 К в течение одного часа в вакууме увеличивает высокотемпературную стабильность резисторов. Эти технологии были внедрены в НИИ авиационного приборостроения (г. Саратов) при создании высокотемпературных тензодатчиков.

Для изготовления тензодатчиков на металлических мембранных потребовались высокотемпературные диэлектрики. Изоляционные свойства диэлектрических пленок SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были изучены в условиях высоких температур до 773 К [7]. Пленки толщиной (0,3–1) мкм осаждались на металлические мембранные ионно-плазменным распылением в магнетронных распылительных системах в атмосфере кислорода или смеси аргона с кислородом при давлении рабочего газа  $3 \cdot 10^{-1}$  Па. Образцы выдерживались в течение нескольких часов при фиксированной температуре 200, 250 и 300 °C, после чего проводились повторные измерения  $\operatorname{tg} \delta$  и токов утечки при  $U = 10$  В. До температурных испытаний все образцы при комнатной температуре имели малые токи утечки ( $10^{-13}$ – $10^{-12}$ ) А и  $\operatorname{tg} \delta = (1–3) \cdot 10^{-3}$ . При температуре выше 300 °C изоляционные свойства пленок постепенно ухудшаются. Уменьшение тока и  $\operatorname{tg} \delta$  в первые сутки, как установлено специальными экспериментами, связано с изменением структуры пленки, ее уплотнением и отжигом дефектов. Параметры МДМ-структур после окончания термических испытаний (около 1000 ч) были измерены в диапазоне температур от комнатной до 350 °C. Результаты показывают, что токи утечки и тангенс угла диэлектрических потерь в основном продолжают удовлетворять предъявляемым требованиям (при  $T = 350$  °C ток утечки составляет  $10^{-8}$  А,  $\operatorname{tg} \delta \leq 0,02$ ). Аналогичное поведение показывают структуры Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al.

Ионно-плазменные методы нашли широкое применение для получения диэлектрических покры-

тий для оптических целей. Нами были разработаны устройства на основе пенниговского разряда для нанесения многослойных интерференционных зеркал и фильтров на основе пленок окиси кремния и титана [8, 9]. Для напыления использовались две газоразрядные камеры с катодами из кремния и титана, которые поочередно подводились под подложки. Контроль толщины пленок осуществлялся посредством сквозного фотометрирования.

Были изготовлены узкополосные 17-слойные фильтры на основе пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , обеспечивающие при  $\lambda = 642,6$  нм пропускание 82%,  $\Delta\lambda = 6,4$  нм [9]. Изготовленные 15-слойные зеркала имели коэффициент отражения, близкий к 100% при  $\lambda = (500\text{--}600)$  нм [8]. Полученные многослойные структуры обладали хорошей адгезией, высокой механической прочностью и стабильностью оптических характеристик.

Дальнейшее продолжение работ было связано с разработкой технологических процессов напыления функциональных тонкопленочных покрытий на поверхность гетероэпитаксиальных структур оптоэлектронных приборов при выполнении в 2010 г. совместного проекта ТУСУРа и ОАО «НИИПП» в рамках Постановления Правительства № 218 «Разработка высокоеффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства» [10].

При участии кафедры ФЭ в данном проекте были разработаны ионно-плазменные технологии напыления оптических просветляющих покрытий, нанесенных на гетероструктуры  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  для синих светодиодов в условиях ограниченного воздействия плазмы [11, 12]. Для проведения экспериментов исследуемые пленки были получены магнетронным распылением мишней из кремния, тантала, титана, кремния с добавкой углерода в среде  $\text{Ar} + \text{O}_2$ . Наиболее значительный эффект просветления наблюдался для пленок  $\text{SiO}_2$ .

Технологии формирования микрорельефных поверхностей в просветляющих покрытиях разрабатывались на примере пленок  $\text{SiO}_2$  с использованием электронно-лучевой литографии и контактной фотолитографии [12]. Способ изготовления светодиода с использованием микрорельефа в просветляющем покрытии, полученного методом электронно-лучевой литографии, защищен патентом [13]. Покрытие  $\text{SiO}_2$  наносилось на гетероструктуру методом магнетронного распыления с отведением электронной бомбардировки от гетероструктуры, поскольку микрорельеф формируется не на самой гетероструктуре, а в оптическом слое  $\text{SiO}_2$ , что позволяет выводить свет как через слои  $\text{GaN-}n$ , так и через  $\text{GaN-}p$  типа с малой глубиной гетероперехода без ухудшения параметров гетероструктуры. Повышение внешней квантовой эффективности достигается за счет эффекта просветления на границе  $\text{GaN-}n/\text{SiO}_2$  и за счет наличия рассеивающего свет микрорельефа в слое  $\text{SiO}_2$  в виде наноострий с плотностью  $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2}$ .

Разработки кафедры ФЭ, выполняемые в рамках НИР, в последние годы позволили значительно расширить сферу применения ионно-плазменных технологий за счет получения диэлектрических пленок  $\text{SiO}_2$  с контролируемой пористостью [14]. Такие пленки могут применяться как в микроэлектронике в качестве изоляционных материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, фотонике, в качестве просветляющих покрытий в оптоэлектронных приборах, эмиссионной электронике в качестве накаливаемого источника электронов [15], так и в качестве исходных материалов для получения наномембран и селективных газочувствительных сенсорных устройств [16].

Образование развитой пористой структуры приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости до значения  $\epsilon = 2,5$ , тангенса угла диэлектрических потерь до значения  $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ , ширины оптической щели Тауца до значения  $E_T = 4,5$  эВ, а также показателя преломления до значения  $n = 1,35$  [17]. Осаждение модифицированных углеродом пленок  $\text{SiO}_2$  на световыводящую поверхность светодиода на основе нитрида галлия привело к увеличению внешнего квантового выхода [18].

В последние годы на кафедре ФЭ ведутся интенсивные работы по созданию ионно-плазменных технологий для напыления низкоомных оптически прозрачных пленок ITO на поверхности светодиодных гетероструктур [19]. Разработаны технологии ITO (оксид индия, легированный оловом *indium tin oxide*), с контролируемыми значениями удельного поверхностного сопротивления от (5–10) Ом/□ до (2–4) МОм/□ и коэффициентом пропускания излучения в видимом диапазоне от 5 до 90% [20]. Полученное минимальное значение поверхностного сопротивления соответствует мировому уровню.

Процесс отработки данной технологии заключался в напылении пленок ITO методом реактивного магнетронного распыления металлической мишени из сплава индия (90%) и олова (10%) в кислородосодержащей атмосфере с парциальным давлением кислорода, изменяемым от напыления к напылению в диапазоне (0,02–0,8) Па. При этом, минимальное сопротивление оптически прозрачных пленок удалось достичь при парциальном давлении кислорода в составе газовой смеси 0,018 Па и составила около 1000 Ом/□. Снизить поверхностное сопротивление пленок удалось, проводя их отжиг в течение 30 мин при температуре выше 250 °C в вакууме сразу после напыления без развакуумирования рабочей камеры. После проведения такого высокотемпературного отжига поверхностное сопротивление пленок снижалось в среднем на два порядка и составляло менее 10 Ом/□ [21].

При внедрении разработанных технологий формирования функциональных тонкопленочных слоев в производство оптоэлектронных приборов ОАО «НИИ ПП» возникла потребность в адаптации процесса напыления применительно к напылению покрытий ионно-плазменным методом на поверх-

ность гетероэпитаксиальных структур оптоэлектронных приборов. Такая потребность вызвана тем, что при нанесении покрытий методом магнетронного распыления гетероэпитаксиальная структура прибора подвергается значительной бомбардировке высокоэнергетическими заряженными частицами, что вызывает в ней появление радиационных дефектов, а также вакансий азота, которые являются донорами в GaN и что, безусловно, ведет к ее деградации. С целью уменьшения негативного воздействия плазмы на гетероструктуры кафедрой физической электроники было разработано и защищено патентом добавочное устройство к магнетронной распылительной системе, отводящее заряженные частицы от подложки и растущей плёнки в процессе ионно-плазменного напыления и тем самым предотвращающее электронно-ионную бомбардировку подложки [22].

В результате применения отклоняющей системы при напылении пленок ITO на поверхность слоя *p*-GaN гетероэпитаксиальной структуры AlGaNInN энергия электронов была уменьшена в пять раз, а концентрация плазмы у поверхности гетероэпитаксиальной структуры снизилась более чем на полтора порядка [23]. Предлагаемый способ может быть реализован на большинстве промышленных установок магнетронного напыления.

### Литература

1. Данилина Т.И. Устройство для напыления диэлектрических пленок / Т.И. Данилина, Е.В. Иванова // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. – М., 1971. – № 11. – С. 21.
2. О механизме влияния электронно-ионной бомбардировки при реактивном распылении на рост диэлектрических пленок / Л.Р. Битнер, В.А. Веденников, Т.И. Данилина и др. // Изв. вузов. Физика. – Томск, 1976. – № 12. – С. 11–15.
3. Свойства пленок нитрида кремния / Г.А. Воробьев, Т.И. Данилина, В.П. Кривошеков и др. // Изв. АН СССР: Неорганические материалы. – 1974. – Т. 10, № 11. – С. 1972–1975.
4. Битнер Л.Р. Исследование процесса реактивного катодного распыления / Л.Р. Битнер, Т.И. Данилина // Микроэлектроника. – М., 1979. – Т. 8, № 1. – С. 71–73.
5. Веденников В.А. Применение низковольтного пенинговского разряда для получения диэлектрических пленок / В.А. Веденников, Т.И. Данилина. // Микроэлектроника. – М., 1973. – Т. 2, № 1. – С. 248–251.
6. Данилина Т.И. Электрофизические свойства диэлектрических пленок в МДМ-структурках / Т.И. Данилина, П.Е. Троян // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 4. – С. 8–11.
7. Битнер Л.Р. Высокотемпературные резистивные и диэлектрические пленки / Л.Р. Битнер, В.А. Веденников, Т.И. Данилина // Приборы и системы управления. – М., 1990. – № 3. – С. 36–38.
8. Битнер Л.Р. Устройство для нанесения многослойных оптических покрытий методом реактивного катодного распыления / Л.Р. Битнер, Т.И. Данилина, А.В. Марьин // ОПМ. – 1980. – № 3. – С. 43–44.
9. Битнер Л.Р. Получение оптических покрытий в установке ионного распыления / Л.Р. Битнер, Д.В. Гунбин, Т.И. Данилина // ОПМ. – 1983. – № 9. – С. 28–30.
10. Комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old/tusur/ru/ru/science/high-tech/>, свободный (дата обращения: 07.06.2017).
11. Данилина Т.И. Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 64–67.
12. Гребнева Ю.Ю. Формирование микрорельефа методами электронно-лучевой литографии и контактной фотолитографии / Ю.Ю. Гребнева, Т.И. Данилина, И.А. Чистоедова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – С. 175–177.
13. Пат. 2 504 867 РФ, МПК B 82 B 3/00, B 82 Y 40/00, Н 01 L 33/40. Способ изготовления светодиода / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова (РФ). – № 2 012 100 323 / 28; заявл. 10.01.12, опубл. 20.01.14. Бюл. № 2.
14. Пат. 2 439 743 РФ, МПК H 01 L 21 316, B 82 B 3/00. Способ получения пористого диоксида кремния / С.П. Усов, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян (РФ). – № 2 010 118 778 / 28; заявл. 11.05.10; опубл. 10.01.12. Бюл. № 1.
15. Пат. 107 399 РФ, МПК H 01 J 9/02. МДМ-катод / С.П. Усов, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян (РФ). – № 201 110 075 3/07; заявл. 12.01.11; опубл. 10.08.11. Бюл. № 22.
16. Пат. 101 197 РФ, МПК G 01 N 27 12. Чувствительный элемент датчика углеводородов / С.П. Усов, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян (РФ) – № 201 011 621 5/28; заявл. 23.04.10; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.
17. Троян П.Е. Технология синтеза и свойства пористых оксидных пленок / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 72–75
18. Пат. 2 485 630 РФ, МПК H 01 L 33/00. Способ изготовления светодиода / Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова (РФ). – № 201 113 2814; заявл. 08.04.11; опубл. 20.06.13. Бюл. № 17.
19. Жидик Ю. С. Технология получения электропроводящих пленок ITO высокой оптической прозрачности с низким значением величины удельного поверхностного сопротивления / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – С. 169–171.
20. Жидик Ю.С. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления // Ю.С. Жидик, П.Е. Троян, Ю.С. Сахаров // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 99–102.
21. Сахаров Ю.В. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия легированного оловом / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). – С. 85–88.
22. Пат. 2 601 903 РФ, МПК C 23 C 14/35, Н 01 J 37/317, Н 01 J 37/34. Способ напыления тонкопленочных покрытий на поверхность полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур методом магнетронного распыления / П.Е. Троян, Г.И. Гумерова, Ю.С. Жидик (РФ). – 2 015 108 566/02; заявл. 11.03.15; опубл. 10.11.16. Бюл. № 31.
23. Жидик Ю.С. Технология формирования покрытий на светодиодных гетероструктурах методом магнетронного распыления на примере нанесения пленок ITO / Ю.С. Жидик, П.Е. Троян // Доклады Том. гос. ун-та сис-

тем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4(34). –  
С. 52–55.

**Жидик Юрий Сергеевич**  
Аспирант каф. ФЭ ТУСУРа  
Тел.: 8-923-414-12-32  
Эл. почта: Zhidikyur@mail.ru

**Данилина Тамара Ивановна**

Канд. техн. наук,  
профессор каф. физической электроники (ФЭ) ТУСУРа  
Тел.: +7-960-971-27-43  
Эл. почта: danti@ms.tusur.ru

Danilina T.I., Troyan P.E., Sakharov Y.V., Zhidik Y.S.  
**Ion-plasma methods to obtain nanostructures**

**Троян Павел Ефимович**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ФЭ ТУСУРа  
Тел.: 8 (383-2) 41-39-36  
Эл. почта: P.E. Troyan@mail.ru

The article presents up-to-date results of scientific and technical activities by TUSUR scientific school investigating to the methods to obtain nanostructures using ion-plasma deposition technology. This research team originated under the direction of G. A. Vorobyev in the year of 1970. The results of the carried out research in this field are presented, as well as the information on their introduction into microelectronics production in the form of nanolayers for various purposes.

**Keywords:** Ion-plasma spraying; magnetron sputtering system; penning system; dielectric, resistive and conductive nanostructures.

**Сахаров Юрий Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. ФЭ ТУСУРа  
Тел.: 8-923-408-06-76  
Эл. почта: Sakh99@mail.ru