

УДК 621.382.032.21

Т.И. Данилина, Н.В. Скотников

Моделирование процессов осаждения на сложные профили

Работа посвящена моделированию осаждения нанослоев для пассивации Т-образного затвора. Рассмотрены основные модели осаждения TCAD и их возможность использования для наращивания сложных профилей. Проанализирован математический аппарат технологического моделирования, а именно модель струны и метод Монте-Карло. Представлены результаты моделирования пассивации Т-образного затвора методом Монте-Карло при различных температурах и даны рекомендации для практической реализации данной операции.

Ключевые слова: Т-образный затвор, TCAD, метод Монте-Карло, осаждение нанослоев.

В настоящее время при создании наноструктур требуется осаждать нанослои на сложные профили. Данная операция используется при формировании МДМ-катодов, в технологии СБИС, для формирования Т-образных затворов в *p*-HEMT-транзисторе и др. Моделирование в комплексе с экспериментальными данными позволяет сократить трудозатраты на отработку технологических процессов изготовления подобных приборов. Методы моделирования разнообразны, но наиболее точные результаты дают методы Монте-Карло и модель струны. Оба этих метода заложены в приборно-технологическом комплексе TCAD. Настоящая работа посвящена моделированию процессов осаждения слоёв для наращивания Т-образного затвора *p*-HEMT-транзистора.

Для осаждения слоёв использовались методы термического испарения в вакууме, ионно-плазменное осаждение, плазмохимическое осаждение из газовой фазы и др. При термическом испарении в вакууме вещество доходит до подложки по прямолинейным траекториям. Количество испарённых частиц, поступающих на единицу поверхности подложки, подчиняется закону косинуса и зависит от конфигурации испарителя.

При испарении из точечного источника количество вещества, поступающего на единицу поверхности, определяется формулой [1]:

$$dQ = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\cos\theta}{r^2}.$$

При испарении с поверхностного испарителя малой площади

$$dQ = \frac{Q}{\pi} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\theta \cdot \frac{ds_2}{r^2},$$

где dQ – количество вещества, поступающего на единицу поверхности подложки ds_2 ; Q – общее количество вещества, испарённого с испарителя ds_1 за время t , кг; θ – угол между направлением испарения r и нормалью к поверхности подложки; r – расстояние от испарителя до подложки; φ – угол между нормалью к площадке испарителя и направлением испарения.

В этом случае осаждение является однонаправленным и частицы испарённого вещества не будут попадать в «затенённые» области. Для устранения этой проблемы возможны варианты испарения из двух и более источников.

Ионно-плазменное осаждение реализуется распылением мишени в виде диска или магнетронным распылением мишени в виде кольца. Оно также подчиняется закону косинуса. Для того чтобы вещество поступало нормально к поверхности, устанавливают коллиматор. Все методы осаждения из газовой фазы (CVD) можно отнести условно к изотропному процессу, когда частицы поступают на подложку под всевозможными углами.

Скорость роста плёнки в программном комплексе Silvaco TCAD при CVD-осаждении рассчитывается по формуле [2]

$$R(x, y) = DEP.RATE[(1 - STEP.COV)\cos\theta + STEP.COV],$$

где $R(x, y)$ – скорость роста плёнки на подложке в точке с координатами (x, y) ; $DEP.RATE$ – скорость роста пленки на горизонтальной поверхности; $STEP.COV$ – степень покрытия ступени; θ – угол между горизонтальной плоскостью и скоростью роста плёнки.

При $STEP.COV = 0$ материал осаждается анизотропно, при $STEP.COV = 1$ происходит изотропное осаждение.

Скорость роста плёнки при однонаправленном осаждении (рис. 1, а) определяется по формулам: $R(x,y)=0$, если точка находится в тени; $R(x,y)=C\sin(\omega \cdot i)+C\sin(\omega \cdot j)$, если точка в незатенённой области, где C – скорость роста плёнки на горизонтальной незатенённой поверхности; ω – угол между осью y и направлением потока; i, j – единичные векторы.

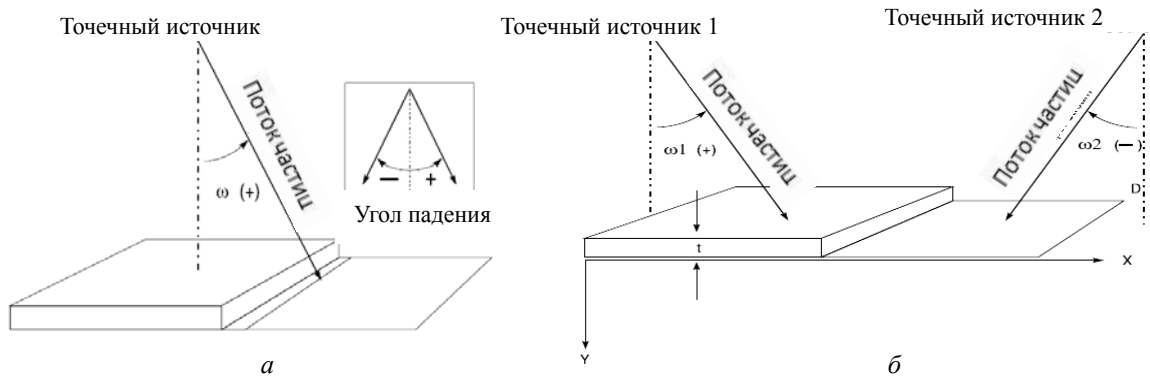
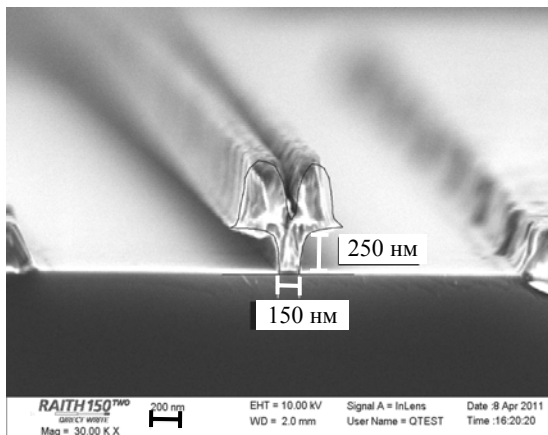


Рис. 1. Модель однонаправленного осаждения: а – из одного источника; б – из двух источников

Скорость роста плёнки при двунаправленном осаждении (рис. 1, б) определяется по формулам: $R(x,y)=0$, если точка находится в тени; $R(x,y)=C\sin(\omega_1 \cdot i)+C\sin(\omega_1 \cdot j)$ или $R(x,y)=C\sin(\omega_2 \cdot i)+C\sin(\omega_2 \cdot j)$, если точка частично затенена; $R(x,y)=C(\cos(\omega_1)+\cos(\omega_2))i+C(\sin(\omega_1)+\sin(\omega_2))j$, если точка не затенена.

При использовании однонаправленной и двунаправленной моделей осаждения используется модель струны. Результаты моделирования показали, что данный метод не позволяет рассчитывать попадание частиц в область геометрической тени. CVD-модель даёт идеализированный результат, когда осаждение вещества происходит изотропно и результаты моделирования не достижимы в практическом применении. На практике для полной пассивации Т-затвора возможно использование конфигурации из нескольких испарителей, но смоделировать это в данном программном комплексе не представляется возможным.

Более универсальным методом моделирования является метод Монте-Карло, так как он позволяет учитывать ряд дополнительных факторов при осаждении, в том числе диффузию атомов осаждаемого вещества по поверхности [3], а также вероятность прилипания частицы к подложке. За исходные параметры для осаждения диэлектрика был принят маршрут при реализации Т-образного затвора для р-НЕМТ-транзистора (НПФ «Микран»). На рис. 2 представлена микрофотография Т-образного затвора, полученная на электронном микроскопе установки RAITH 150 с длиной затвора 150 нм и высотой ножки 250 нм. В маршруте заложена операция зарощивания Т-образного затвора слоем диэлектрика.



В модели были заложены следующие параметры: скорость осаждения – 100 нм/мин; материал осаждения – SiO_2 ; угол падения частиц – 0 (нормально к поверхности); число моделируемых частиц – 10000; время осаждения – 100 с; коэффициент прилипания – 0,5; диффузионная длина L_d изменялась в зависимости от температуры.

Рис. 2. Микрофотография Т-образного затвора

Для определения диффузионной длины были сделаны расчёты в зависимости от температуры подложки. При температуре $T = 500$ К, $L_d = 0,1383$ мкм; при $T = 600$ К, $L_d = 0,3875$ мкм. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Результаты моделирования методом Монте-Карло показали, что при $T = 500$ К и $L_d = 0,1383$ мкм осадить плёнку на ножку Т-образного затвора невозможно (рис. 3, а). При увеличении температуры

до 600 К ($L_d = 0,3875$ мкм) заплывается отрицательный угол структуры (рис. 3, б). Толщина слоя на ножке составляет 0,5 от толщины на горизонтальной поверхности. Равномерное покрытие Т-образного затвора можно получить при дальнейшем увеличении температуры подложки до 700 К.

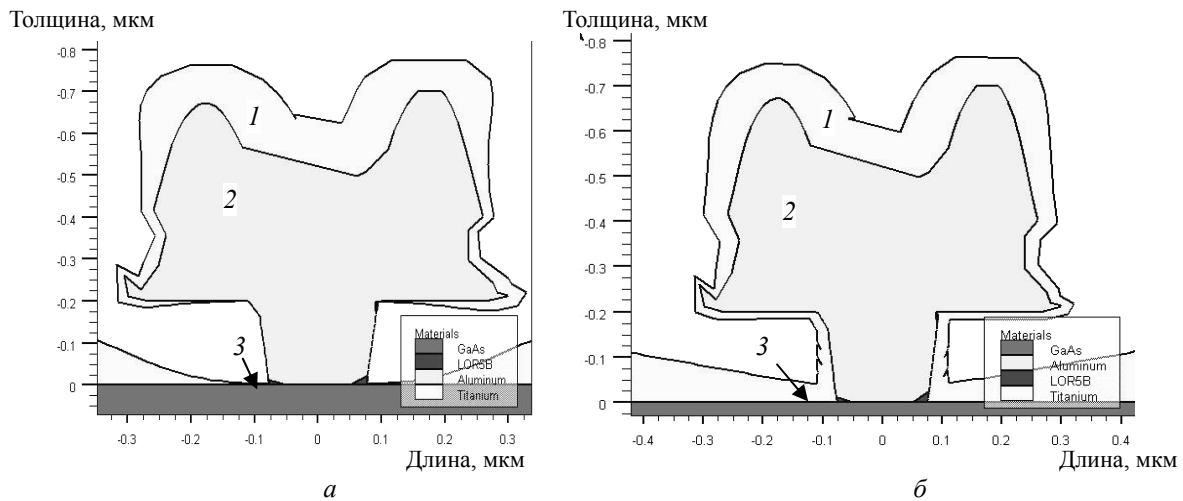


Рис. 3. Профиль осаждения: а – при $L_d = 0,1383$ мкм, $T = 500$ К; б – при $L_d = 0,3875$ мкм, $T = 600$ К; где 1 – титан, 2 – алюминий, 3 – арсенид галлия.

В работе показано, что моделировать процесс осаждения на сложные профили и обрабатывать технологические режимы целесообразно с использованием TCAD методом Монте-Карло. Установлено, что наибольшее влияние на процесс зарастивания Т-образного затвора оказывает температура подложки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 74/10 от 15.07.2010 в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Смирнова К.И. Тонкие плёнки в микроэлектронике: учеб. пособие. – Томск.: ТУСУР, 2007. – 109 с.
2. Форум разработчиков полупроводниковых приборов: в базе данных форума содержатся руководства пользователей для различных систем TCAD.-М [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.engr.sjsu.edu/~dparent/Silvaco/athena.pdf, свободный (дата обращения: 02.10.2012).
3. Королёв М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых микросхем. – М.: Наука, 2009. – 205 с.

Данилина Тамара Ивановна

Канд. техн. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-960-971-27-43
Эл. почта: danti@ms.tusur.ru

Скотников Никита Владимирович

Студент ТУСУРа
Тел.: 8-952-804-26-34
Эл. почта: nickky@sibmail.com

Danilina T.I., Scotnicov N.V.

Modelling of sedimentation process on complex profiles

The research is devoted to modelling of a sedimentation process of nano-layers for passivation of a T-gate. In the paper we investigated general TCAD sedimentation models, their usage for refilling of complex profiles. We analyzed a mathematical tool for technological modelling, namely a string model and a Monte-Carlo method. As a result we offer modelling of passivation of a T-gate by Monte-Carlo method at different temperatures and we give recommendations for practical implementation of this operation.

Keywords: T-gate, TCAD, Monte-Carlo method, nano-layers sedimentation.