

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЛЕНОК $g-C_3N_4$

Фам В. Т.¹, Максимов С. Е.¹, Нгуен Тай Динх², Trong Ha Nguyen³, Dinh Tuyen Nguyen³

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

² Академия ПВО ВВС, Ханой, Вьетнам

³ Университет Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам

Аннотация. Изготовлены и исследованы экспериментальные пленочные МДП-структуры с диэлектриком, состоящим из слоев SiO_2 и $g-C_3N_4$. Измеренные на них вольт-фарадные характеристики и вычисленные по ним диэлектрические проницаемости этих материалов указывают на существенную роль зарядовых эффектов в $g-C_3N_4$.

Ключевые слова: $g-C_3N_4$, пленка, C-V характеристика, диэлектрическая проницаемость.

Введение

Графитоподобный нитрид углерода ($g-C_3N_4$) – полупроводниковый материал с широкой запрещенной зоной (~2,7 эВ), высокой химической стабильностью и низкой электропроводностью, что делает перспективным кандидатом для диэлектрических применений, включая изоляторы и управляющие затворы, управление тонкопленочными транзисторами [1,2]. Исследование его диэлектрических свойств имеет важное значение при разработке электронных и оптоэлектронных приборов. Это становится все более важным, если принять во внимание тенденцию к повышению производительности и универсальности устройств, когда понимание диэлектрических свойств необходимо для оптимизации конструкции и повышения производительности работы. Диэлектрическая проницаемость влияет на то, как устройства сохраняют и удаляют заряд, а также определяет порог утечки тока в полупроводниковых устройствах на его основе.

Проведенное нами экспериментальное исследование относится не только к вольт-фарадным (C-V) характеристикам и диэлектрической проницаемости $g-C_3N_4$, когда его пленки используются самостоятельно, но и когда он сочетается с пленками из диоксида кремния (SiO_2), который является распространенным диэлектрическим материалом в

полупроводниковых технологиях и широко используется в качестве изолирующего слоя в полупроводниковых приборах и в затворах МОП-транзисторов.

Методика проведения эксперимента

Конструкция экспериментальных пленочных структур показана на рис. 1. При их формировании в качестве подложек использованы пластины кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом.см.

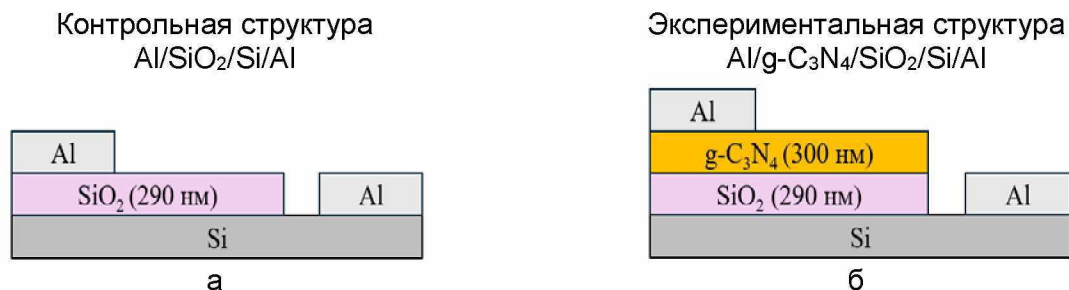


Рисунок 1 - Структура контрольного (а) и экспериментального (б) образцов

На контрольном образце в качестве диэлектрика был слой термически выращенного SiO₂ толщиной 290 нм, а на экспериментальном образце пленочная структура g-C₃N₄/SiO₂ с аналогичной толщиной SiO₂. Пленку g-C₃N₄ формировали методом скоростного химического осаждения [3] при температуре 575 °С в течение 5 мин. Его толщина составляла 300 нм. Пленочные алюминиевые электроды толщиной порядка 100 нм наносили методом магнетронного распыления, используя контактную маску с квадратными окнами размером 1x1 мм. Расстояние между окнами составляло 12 мм.

Используя измеритель импеданса E7-25, регистрировали C-V характеристики контрольной и экспериментальной структур при комнатной температуре в диапазоне напряжений от -10 до +10 В, а также частотную зависимость их емкости в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц.

Результат измерений

На рис.2 приведены C-V характеристики, снятые на контрольной структуре, в которой присутствовал только один диэлектрик – SiO₂, и на экспериментальной структуре с двухслойным материалом g-C₃N₄/SiO₂ между токоподводящими электродами.

Вид C-V характеристики контрольной структуры является типичным для МОП-структур на кремнии [4]. При положительном напряжении на Al электроде, контактирующем с SiO₂, емкость остается практически неизменной во всем исследованном диапазоне приложенных внешних напряжений. При смене полярности приложенного напряжения имеет место резкое снижение емкости в интервале от нуля до -5 В, после которого значения емкости остаются неизменными.

Отмеченные особенности C-V характеристики контрольной структуры объясняются дрейфом положительных ионов в окисле и/или перераспределением подвижных носителей заряда [5]. На границе Si/SiO₂ ионы, как правило, закреплены из-за высокой разупорядоченности окисла, а ионы, находящиеся на границе металл/окисел, могут быть подвижными. Кроме этого, эффективный заряд на границе Si/SiO₂, влияющий на измеряемую емкость, может изменяться и вследствие туннельной инжекции свободных носителей из полупроводника на медленные ловушки на этой границе. Такой механизм становится преобладающим при отрицательных напряжениях смещения, приводя к уменьшению общей регистрируемой емкости структуры.

Отличительными особенностями C-V характеристики экспериментальной структуры являются более низкие значения регистрируемой емкости и расширенная область монотонного изменения емкости в зависимости от приложенного напряжения. В данном случае она симметрична относительно нуля и простирается от -5 В до +5 В, что можно связать с зарядовыми эффектами, принесенными g-C₃N₄.

Контрольная структура
Al/SiO₂/Si/Al

Экспериментальная структура
Al/g-C₃N₄/SiO₂/Si/Al

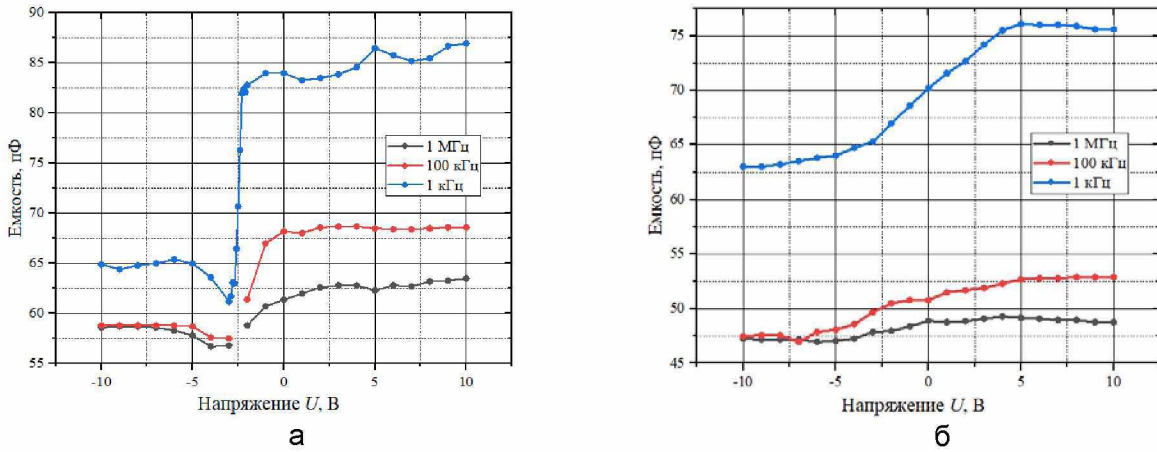


Рисунок 2 - Вольт-фарадные характеристики контрольной (а) и экспериментальной (б) структур

Отмеченные выше закономерности проявляются во всем исследованном частотном диапазоне (100 Гц – 1 МГц). Однако наиболее ярко они выражены на низких частотах. Рисунок 3 иллюстрирует изменение емкости анализируемых структур от частоты изменения приложенного напряжения.

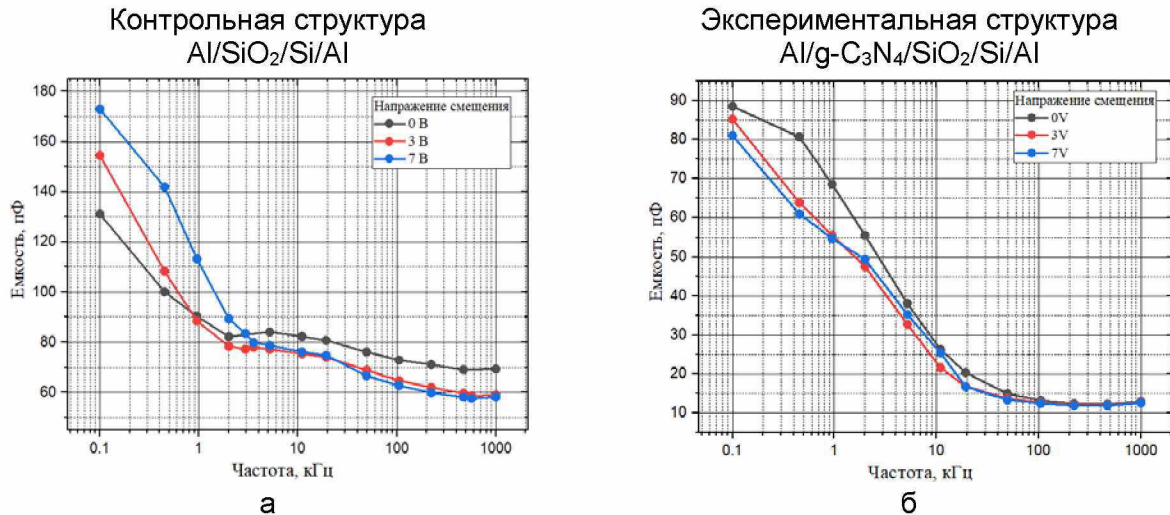


Рисунок 3 - Частотные зависимости емкости контрольной (а) и экспериментальной (б) структур

На обоих типах структур отмечено монотонное уменьшение их емкости с повышением частоты. На контрольных образцах оно наиболее существенно до 2 – 3 кГц, на экспериментальных при более высоких частотах – 90 – 100 кГц.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о существенной роли зарядовых состояний как в самом g-C₃N₄, так и на его границах с Al и SiO₂.

Расчет диэлектрической проницаемости материалов

По полученным низкочастотным значениям емкости контрольной и экспериментальной структур нами рассчитаны диэлектрические проницаемости SiO₂ и g-C₃N₄. В использованной нами эквивалентной схеме экспериментальной структуры ее емкость представляем двумя последовательно соединенными конденсаторами соответственно с емкостью пленки SiO₂ (C_{SiO2}) и емкостью пленки g-C₃N₄ (C_{g-C3N4}). При этом контрольная структура включает только пленку SiO₂. Измеряемая на ней емкость

$$C_1 = C_{SiO_2}, \quad (1)$$

а для экспериментальной измеряемая емкость C₂ определяется как

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{g-C_3N_4}} + \frac{1}{C_{SiO_2}} \Leftrightarrow C_{g-C_3N_4} = \frac{C_1 C_2}{C_1 - C_2}. \quad (2)$$

В общем случае емкость конденсатора определяется его конструктивными параметрами и диэлектрической проницаемостью диэлектрика. Для конденсатора с плоскими параллельными электродами это [6]:

$$C_d = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (3)$$

где ε_d – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S – площадь электрода; d – толщина диэлектрика.

Расчеты по значениям емкостей $C_1 = 84$ пФ, $C_2 = 70$ пФ, полученным на частоте 1 кГц, дали величину диэлектрической проницаемости SiO_2 равную 2,8, а для $g-C_3N_4$ равную 14,2. Полученная величина диэлектрической проницаемости SiO_2 находится в удовлетворительном согласии с известными данными (2–5) [7]. Величина же диэлектрической проницаемости $g-C_3N_4$ в пределах экспериментальной неопределенности укладывается в диапазон результатов (14–16), полученных в [1] для пленочной структуры $g-C_3N_4/Al_2O_3$.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование позволило найти зависимость емкости структуры с двухслойным диэлектриком, состоящим из SiO_2 и $g-C_3N_4$, от напряжения и частоты приложенного напряжения. Их особенности, а также рассчитанные значения низкочастотной диэлектрической проницаемости этих материалов указывают на значительную роль зарядовых эффектов в $g-C_3N_4$ в его диэлектрических свойствах, что требует углубленного исследования для успешного применения этого материала в микро- и нанoeлектронике.

Благодарность

Авторы выражают благодарность И. Кашко за изготовление контактов к исследуемым структурам и профессору В. Е. Борисенко за постановку цели исследования и полезное обсуждение полученных результатов.

Список использованных источников:

1. Patra, P. C. Dielectric constant of thin film graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) and double dielectric $Al_2O_3/g-C_3N_4$ / P. C. Patra, Y. N. Mohapatra // Appl. Phys. Lett. – 2021. – Vol. 118. – Iss.10. – P. 103501R. – DOI:10.1063/5.0045911.
2. Шумский, И. А. Измерение вольт-фарадных характеристик полупроводниковых приборов – выбор современного бюджетного решения / И. А. Шумский // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2017. – № 2. – С. 10-16.
3. Chubenko, E. B. Rapid chemical vapor deposition of graphitic carbon nitride films / E. B. Chubenko, S. E. Maximov, C. D. Bui, V. T. Pham, V. E. Borisenko // Materialia. – 2023. – Iss. 28. – P. 101724.
4. Боброва, Е. А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Том 42. – № 11. – С. 1380–1383.
5. Тутов, Е. А. Кремниевые МОП-структуры с нестехиометрическими металлоксидными полупроводниками / Е.А. Тутов, С.В. Рязцев, Е.Е. Тутов, Е.Н. Бормонтов // Журнал технической физики. – 2006. – Том 76. – № 12. – С. 65–68.
6. Гурин, Н. Т. Исследование полупроводниковых структур методом вольтфарадных характеристик: методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Микроэлектроника» / Сост. д. ф.-м. н., проф. Н. Т. Гурин. – Ульяновск : УлГУ, 2016. – 51 с.
7. Воротилов, К. А. Особенности измерения диэлектрической проницаемости тонких пленок МДП-структур / К. А. Воротилов, П. А. Лучников, Ю. В. Подгорный, Д. С. Серегин // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2011. – Том 1. – № 1. – С. 220–228.