

СЕКЦИЯ «МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.382

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР ИЗ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

Фам В.Т., Буй К.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Борисенко В.Е. – профессор кафедры МНЭ, доктор физико-математических наук, профессор

Аннотация. Изготовлены образцы многослойных пленок графитоподобного нитрида углерода на кремниевой подложке с индиевыми контактами к пленке. Вольт-амперные характеристики (ВАХ), снятые при протекании тока в плоскости и перпендикулярно плоскости пленки симметричны относительно нулевого смещения и имеют начальные участки (0 – 15 В) с малым практически неизменным током, после которого ток экспоненциально возрастает. Такой характер ВАХ предположительно связан с туннелированием подвижных носителей через межблочные и межслоевые границы в пленке, что может быть использовано для создания новых элементов для электронной обработки информации.

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, $g-C_3N_4$, электрические свойства, транспорт носителей заряда, ВАХ.

Введение. Графитоподобный нитрид углерода ($g-C_3N_4$) активно исследуется в связи с его полупроводниковыми, фотокаталитическими и люминесцентными свойствами, перспективными для практического использования [1]. Как и графит, объемный $g-C_3N_4$ имеет слоистую структуру. Слои состоят из ячеек три-*s*-триазина и связаны между собой слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, что приводит к образованию двумерных (2D) графеноподобных листов. Рассчитанная ширина запрещенной зоны $g-C_3N_4$ близка к экспериментально измеренной, которая составляет порядка 2,7 эВ. К настоящему времени достаточно полно исследована фотолюминесценция этого материала, как в объемном [2-4], так и пленочном [5-7] состоянии. При этом остаются неизученными особенности транспорта носителей заряда в этом полупроводнике и в состоящих из него пленочных структурах, что актуально для разработки на его основе новых твердотельных электронных и оптоэлектронных приборов, а также для повышения эффективности фотокаталитических покрытий.

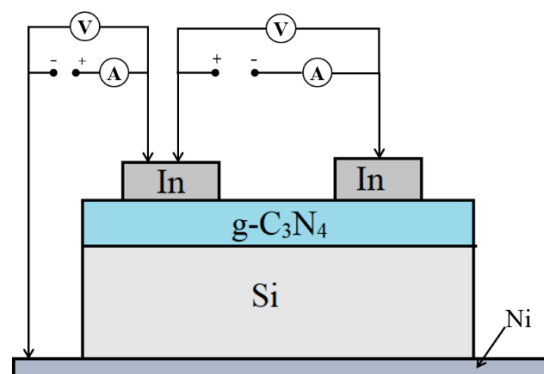
Целью настоящей работы явилось исследование транспорта носителей заряда в многослойных пленках $g-C_3N_4$ путем измерения и анализа вольтамперных (ВАХ) характеристик изготовленных из него структур с индиевыми контактами. Известно, что такие пленки имеют блочную структуру.

Методика экспериментального исследования. Пленочные структуры формировали методом химического осаждения $g-C_3N_4$ при 600 °С из паров меламин на подложке из монокристаллического кремния с *n*-типом проводимости и удельным сопротивлением 0,01 Ом.см [7]. Индиевые контакты механически наносили на поверхность пленки для измерения ВАХ при протекании тока в плоскости пленки, как это показано на рис. 1б. Расстояние между ближайшими контактами составляло 2 мм. Для регистрации ВАХ при протекании тока перпендикулярно плоскости пленки использовали один из поверхностных индиевых контактов и никелевую пластину, контактирующую с обратной стороной кремниевой подложки – рис. 1.

Измерение ВАХ осуществляли при комнатной температуре, используя Keithley 2401. Измерения проводили в темновом режиме и при облучении структуры светом видимого диапазона от осветителя MI-150 (100 Вт).



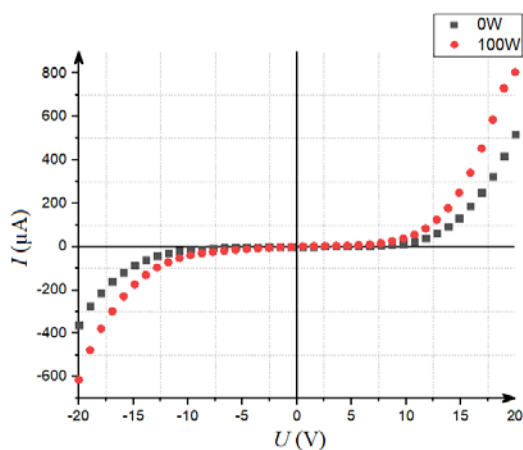
а)



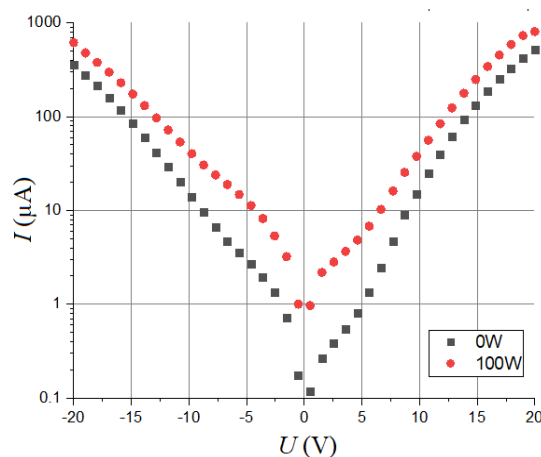
б)

Рисунок 1 – Внешний вид пленочной структуры $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на кремниевой подложке (а) и схема измерения ее вольтамперных характеристик (б)

Экспериментальные результаты. ВАХ экспериментального образца, измеренные при протекании тока в плоскости пленки, показаны на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики пленочной структуры из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при протекании тока в плоскости пленки, снятые в темноте (0W) и при освещении видимым светом (100 W): а – линейная шкала для тока, б – логарифмическая шкала.

Экспериментальные ВАХ имеют следующие особенности. Во-первых, они практически не зависят от полярности приложенного напряжения, то есть симметричны относительно нулевого приложенного напряжения. Во-вторых, в диапазоне от 1 до 10 В существует область, в которой ток через структуру меняется незначительно, а после нее имеет место резкое возрастание тока. В-третьих, освещение структуры приводит к увеличению протекающего тока.

ВАХ, измеренные при протекании тока перпендикулярно плоскости пленки, показаны на рис. 3. Для них характерно наличие области с малым, практически неизменным значением тока, при напряжениях до 15 В, хотя симметричность кривых относительно нулевого напряжения нарушена. При подаче отрицательного напряжения на вывод индия наибольший ток находится в пределах 40–55 мкА при напряжении 20 В, а при напряжении либо близким к нулю или положительному, ток отсутствует. Освещение, также как и в предыдущем случае приводит к увеличению тока.

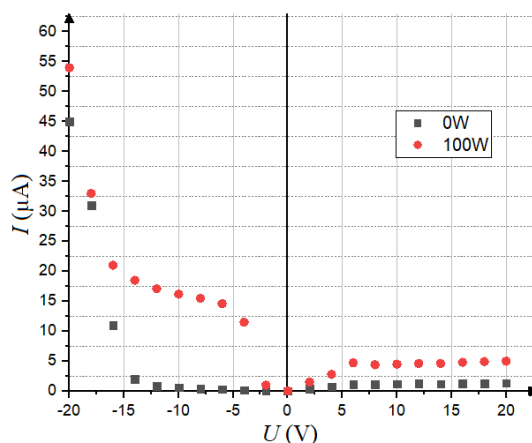


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики пленочной структуры из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при протекании тока перпендикулярно плоскости пленки, снятые в темноте (0W) и при освещении видимым светом (100 W).

Сравнение результатов измерения с использованием других измерительных приборов и положений контактных площадок показало, что они не влияют существенно на отмеченные выше основные особенности ВАХ пленочных структур из $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Обсуждение результатов. Для интерпретации экспериментально наблюдаемых особенностей ВАХ нами предложена эквивалентная электрическая схема, в которой пленка из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ представлена в виде слоистой структуры, состоящей из монокристаллических блоков $g\text{-C}_3\text{N}_4$, отделенных вертикальными и горизонтальными барьерами. Их сопротивление описано в предположении туннельного переноса носителей заряда через них, что позволило учесть отмеченную симметричность и нелинейность экспериментальных ВАХ. Детальное обсуждение этой модели будет дано в последующих публикациях.

Заключение. Экспериментально исследованные ВАХ пленочной структуры из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ показали ее сложный характер, ранее не наблюдавшийся для полупроводниковых приборов, особенно в части наличия области с малым практически неизменным током на ее начальном участке (0 – 15 В), после которого ток экспоненциально возрастает. Такой характер ВАХ мы связываем с блочно-слоистой структурой пленки и наличием в ней межблочных и межслоевых потенциальных барьеров. Подвижные носители заряда преодолевают эти барьеры по механизму туннелирования. Исследованные структуры представляют интерес для создания новых полупроводниковых элементов для электронной обработки информации.

Список литературы

1. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts / A. Thomas [u dp.] // *Journal of Materials Chemistry*. – 2008. – T.18, №41. – С.4893–4908.
2. Effective Prevention of Charge Trapping in Graphitic Carbon Nitride with Nanosized Red Phosphorus Modification for Superior Photo(electro)catalysis / L. Jing, R. Zhu, D.L. Phillips [u dp.] // *Advanced Functional Materials*. – 2017. – T.27, №46. – С.1703484.
3. Solar-Driven Reduction of Aqueous Protons Coupled to Selective Alcohol Oxidation with a Carbon Nitride–Molecular Ni Catalyst System / H. Kasap, C.A. Caputo, B.C.M. Martindale [u dp.] // *Journal of the American Chemical Society*. – 2016. – T.138, №29. – С.9183–9192.
4. A fantastic graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) material: Electronic structure, photocatalytic and photoelectronic properties / G. Dong [u dp.] // *Photochemistry Reviews*. – 2014. – №20. – С. 33–50.
5. Photocatalytic activity enhancement of core-shell structure $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ via controlled ultrathin $g\text{-C}_3\text{N}_4$ layer / Y. Wang [u dp.] // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2018. – №220. – С. 337–347.
6. A simple process to prepare few-layer $g\text{-C}_3\text{N}_4$ nanosheets with enhanced photocatalytic activities / Y. Ma [u dp.] // *Applied Surface Science*. – 2015. – №358-A. – С. 246–251.
7. Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films / E. B. Chubenko, N. G. Kovalchuk, I. V. Komissarov, V. E. Borisenko // *The Journal of physical chemistry*. – 2022. – 5 P.
8. Структурные и фотолуминесцентные свойства графитоподобного нитрида углерода / Баглов А.В., Чубенко Е.Б., Гнатько А.А., Борисенко В.Е., Малашевич А.А., Узлов В.В. // *Физика и техника полупроводников*. – 2020. – том 54. – вып. 2.

UDC 621.382

VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF STRUCTURES FROM GRAPHITE CARBON NITRIDE MULTILAYER FILMS

Pham V.T., Bui C.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus (style T-institution)

Scientific adviser: Borisenko V.E. - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of MNE

Annotation. Samples of multilayer films of graphite carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) on silicon substrate with indium contacts were fabricated. The current-voltage characteristics measured with current flowing in the plane and perpendicular to the film plane are symmetrical and have initial segments (0–15 V) with a low practically constant current, after which the current increases exponentially. This character of the I-V characteristics is presumably associated with the tunneling effect, transporting charge carriers through interblock and interlayer boundaries in the film, which can be used to create new elements for electronic information processing.

Keywords. Graphite carbon nitride, $g\text{-C}_3\text{N}_4$, electrical properties, carrier transport.