

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПЛЕНОК $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ПОДВЕРГНУТЫХ НЕЙТРОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

## THE RESEARCH OF NEUTRON-RADIATED $\text{Si}_3\text{N}_4$ FILMS BY ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE AND PHOTOLUMINESCENT METHODS

*М. Н. Ивин<sup>1</sup>, Н. А. Добычин<sup>1</sup>, В. В. Карзанов<sup>2</sup>, Э. И. Кучукбаева<sup>2</sup>*

*M. N. Ivin<sup>1</sup>, N. A. Dobychin<sup>1</sup>, V. V. Karzanov<sup>2</sup>, E. I. Kuchukbaeva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова»

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

<sup>1</sup>branch of RFNC-VNIIEF «FRPC NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

В работе рассмотрены результаты исследований методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и фотолюминесценции (ФЛ) пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , подвергнутых нейтронному облучению с различными флюенсами.

The study has demonstrated the results of the research realized by electron paramagnetic resonance (EPR) and photoluminescent methods (PL) of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  films under neutron radiation exposure with different fluences.

Аморфный нитрид кремния широко применяется в микроэлектронике. Материал характеризуется высокой механической и термической прочностью, инертностью к различным агрессивным средам, эффектом памяти и т. д. В последние годы интенсивно изучаются люминесцентные свойства нитрида кремния с целью создания излучателя света, совместимого с интегральной кремниевой технологией.

В современной литературе имеется мало сведений о радиационных воздействиях на нитрид кремния, в том числе нет никаких данных по нейтронному воздействию. Поэтому целью данной работы является изучение радиационных свойств аморфного нитрида кремния методами ЭПР и ФЛ.

В данной работе исследовались ФЛ и ЭПР от пленок аморфного нитрида кремния, полученных методом пиролиза и подвергнутых облучению нейтронами с различными флюенсами.

Пиролитические пленки нитрида осаждались на пластины кремния КДБ 12. Толщина пленок  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  составила 200 нм.

После осаждения пленки были отданы на обработку нейтронами с флюенсами ( $\text{н/см}^2$ ):  $\Phi_0 = 0$ ,  $\Phi_1 = 2,45 \cdot 10^{15}$ ,  $\Phi_2 = 5 \cdot 10^{15}$ ,  $\Phi_3 = 7,35 \cdot 10^{15}$ ,  $\Phi_4 = 1 \cdot 10^{16}$  для образцов  $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4$  соответственно.

Фотолюминесценция от наших образцов регистрировалась на комплексе NTEGRASpectra при комнатной температуре. Источником возбуждения служил сине-фиолетовый светодиод (380 нм). Спектры ФЛ регистрировались от 474 до 815 нм. При измерении ФЛ через год после облучения спектры не изменились (образцы хранились при комнатной температуре).

Спектры ЭПР регистрировались на спектрометре Bruker EMX с многократным сканированием.

Все исследуемые пленки нитрида кремния имели широкую полосу ФЛ в видимом диапазоне с максимумом 530–540 нм, что связывается нами с кремний-кремниевыми связями, согласно работе [1] (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что облучение нейтронами при данных флюенсах существенно не влияет на спектры ФЛ исследуемых образцов.

Спектры ЭПР в облученных образцах были примерно одинаковой интегральной интенсивности (т. е. число парамагнитных дефектов практически не зависело от облучения) и состояли из большого числа узких линий на фоне широкой (рис. 2). Широкая линия может быть описана суперпозицией спектров К- и N-центров. Узкие линии имели сильную угловую зависимость.

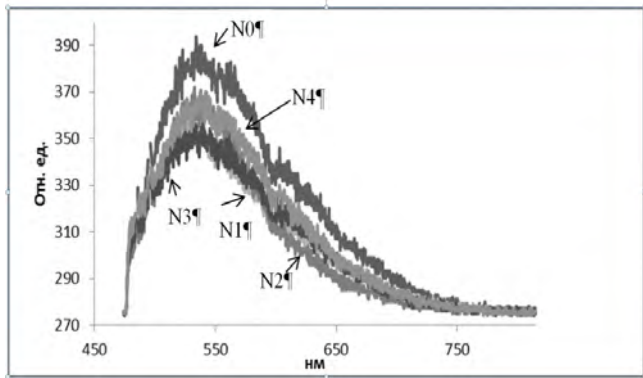


Рис. 1. Спектр ФЛ образцов, облученных нейтронами

Наличие угловой зависимости указывало на то, что парамагнитные центры, обеспечивающие наблюдаемые спектры, находятся либо внутри кремниевой подложки, либо на границе раздела кремний-нитрид кремния. Был выполнен отжиг в инертной среде при температуре  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После отжига спектры люминесценции образцов практически не изменились ни по структуре, ни по интенсивности, а в ЭПР мы увидели снижение общей интегральной интенсивности примерно на порядок и уменьшение числа спектральных линий (рис. 3). Спектр ЭПР до и после отжига принадлежит образцу  $N_3$ , спектры других образцов выглядели таким же образом.

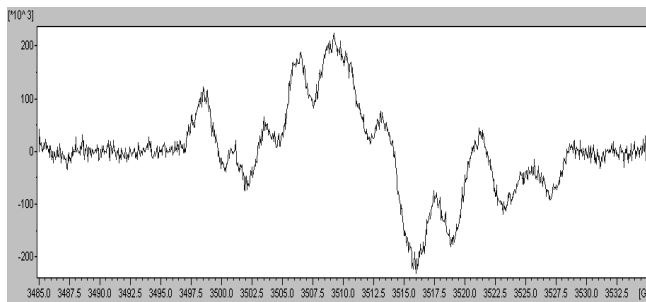


Рис. 2. Спектр ЭПР образца  $N_3$  до отжига

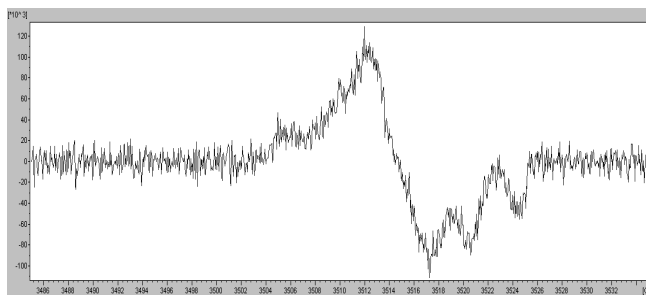


Рис. 3. Спектр ЭПР образца  $N_3$  после отжига при  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Эти спектры обладали угловой зависимостью  $g$ -фактора, но среди них удалось выделить две линии: одна соответствует  $P_{bn}$ -центрам (наблюдалась соответствующая угловая зависимость  $g$ -фактора) [2], а вторая не имела угловой зависимости, ее параметры были следующими:  $\Delta H_{1/2}$  от 3 до 4 Гс,  $g = 2,007 \pm 0,0003$ . Что касается последней линии, то отсутствие у нее угловой зависимости указывает на принадлежность спектра дефекту внутри аморфной пленки нитрида кремния. Нам не удалось найти литературных данных о парамагнитных центрах в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с такими параметрами. Следует отметить и то, что ширина этой линии примерно в два раза меньше, чем для известных парамагнитных дефектов (К-центры, N-центры, D-центры) [3–6] и связанных с незавершенными связями кремния или азота. По нашему мнению здесь следует принять во внимание тот факт, что нейтроны способны не только создавать дефекты типа смещенных атомов, но и вызывать ядерные превращения. Среди всех возможных ядерных реакций с участием нейтронов наиболее вероятной выглядит реакция  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  [7].

### Заключение

Таким образом, нейтронное облучение структур кремний-нитрид кремния при флюенсах до  $10^{16}\text{ см}^{-2}$  практически не сказывается на фотолюминесценции нитрида кремния, обусловленной кремний-кремниевыми связями. Но это облучение производит значительное количество парамагнитных дефектов. Наряду с традиционными дефектами (К-центры, N-центры), здесь наблюдаются  $P_{bn}$ -дефекты, а также возникает спектр ЭПР, который мы связываем с углеродом в позиции азота. Этот дефект может быть продуктом реакции  $^{14}\text{N}(p)^{14}\text{C}$ . При этом 4-х валентный углерод оказывается в позиции 3-х валентного азота и, таким образом, 4 электрон в оболочке углерода оказывается неспаренным, обеспечивая ЭПР. Косвенным подтверждением этого можно считать тот факт, что ширина спектральной линии углерода в два раза меньше, чем у D-центра (кремний в позиции азота): ковалентный радиус углерода в два раза меньше ковалентного радиуса кремния [8]. Меньший ковалентный радиус приводит к тому, что на ядрах азота ниже электронная плотность и соответственно меньше уширение из-за сверхтонкого взаимодействия «углеродного» неспаренного электрона с ядрами азота.

**Список литературы**

1. Тыщенко И. Е., Володин В., Реболе Л., Фельсков М., Скорупа В. Фотолюминесценция пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , имплантированных ионами  $\text{Ge}^+$  и  $\text{Ar}^+$  // ФТП, 1999. **33**, 5. С. 559–566.
2. Stesmans A., Van Gorp G. // Phys. Rev. B, 1995, v.52, № 12, p. 8904–8920.
3. Warren W. L., Lenahan P. M., Curry S. E. // Phys. Rev. Lett., 1990. Vol. 65, N 2. P. 207–210.
4. Jousse D., Kanicki J., Stathis J.H. // Appl. Phys. Lett., 1989. Vol. 54, N 11. P. 1043–1045.
5. Krick D. T., Lenahan P. M., Kanicki J. // Phys. Rev. B., 1988 Vol. 38, N12. P. 8226–8229.
6. Pacchioni G., Erbetta D. Phys. Rev. 1999. B, 60 (18), 12 617.
7. Власов Н. А. Нейтроны. Изд. 2-е. М.: Наука, 1971. С. 552.
8. Бокий Г. Б. Кристаллохимия. М.: Наука, 1971. С. 400.