

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

Ф. Ф. Комаров<sup>1</sup>, И. Н. Пархоменко<sup>1</sup>, И. А. Романов<sup>1</sup>, Л. А. Власукова<sup>1</sup>,  
О. В. Мильчанин<sup>1</sup>, А. К. Тогамбаева<sup>2</sup>, Л. К. Тоганбаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, *bsu.romanov@gmail.com*

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

### ВВЕДЕНИЕ

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. Большинство опубликованных работ посвящено изучению слоев  $\text{SiN}_x$  с избытком кремния. Цель нашей работы – сравнить люминесцентные и электрофизические свойства пленок  $\text{SiN}_x$ , обогащенных кремнием и азотом.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Пленки  $\text{SiN}_x$  разного стехиометрического состава осаждались на подложку Si n-типа с кристаллографической ориентацией (100) методом плазменно-стимулированного газофазного осаждения из смеси моносилана ( $\text{SiH}_4$ ) и аммиака ( $\text{NH}_3$ ) при температуре 300 °С. Стехиометрический состав пленки варьировался в зависимости от соотношения парциальных давлений реагирующих газов  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3$ . Соотношение силана к аммиаку в газовой смеси  $\text{SiH}_4/\text{NH}_3$  составляло 1/1 и 1/10 для образцов А и В, соответственно. Толщина пленок измерялась методом эллипсометрии, и составляла приблизительно 95 нм. Концентрация кремния и азота по глубине в пленке  $\text{SiN}_x$  определялась методом Резерфордского обратного рассеяния (РОР). После осаждения часть вырезанных из подложки с нитридной пленкой образцов отжигалась в атмосфере азота при температурах 800 °С в печи сопротивления в течение часа. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) возбуждались при комнатной температуре He-Cd лазером с  $\lambda_{\text{возб.}}=325$  нм. Для проведения электрофизических измерений к исходной и отожженным структурам  $\text{SiN}_x/\text{Si}$  методом магнетронного осаждения были нанесены прозрачный электрод из ITO и алюминиевый контакт со стороны подложки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе данных РОР был рассчитан стехиометрический параметр « $x$ », определяющий отношение атомов азота к атомам кремния. Для образца А параметр « $x$ » равен 1, тогда как для образца В - 1,5. Известно, что для стехиометрического  $\text{Si}_3\text{N}_4$  параметр  $x=1,3$ . Таким образом, оба образца являются нестехиометрическими. Образец А характеризуется избытком кремния, тогда как образец В – избытком азота.

На рис. 1 показаны спектры фотолюминесценции для исходных и отожженных образцов. Спектр ФЛ исходного образца с избытком кремния представляет собой интенсивную широкую полосу с максимумом ~515 нм. Для исходного образца В с избытком азота ФЛ не наблюдалась. После отжига при температуре 800 °С спектры

ФЛ обоих образцов имеют сходную форму: широкая асимметричная полоса с максимумом  $\sim 490$  нм. Причем интенсивность ФЛ двух отожженных образцов сравнима.

На рис. 2а представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур ИТО/SiN<sub>x</sub>/Si/Al с исходной и отожженной пленками SiN<sub>x</sub>. Прямая ветвь ВАХ соответствует подаче на ИТО отрицательного потенциала. Для исходных образцов ток прямой ветви ВАХ меньше для пленки SiN<sub>x</sub>, содержащей избыточный кремний. После отжига при 800 °С проводимость обеих структур увеличивается, причем в прямой ветви ВАХ ток имеет сравнимые значения для обоих образцов. Стоит также отметить, что после отжига образцов нитрид, содержащий избыток азота имеет лучшую проводимость в обратной ветви ВАХ, по сравнению с нитридом кремния, содержащим избыток кремния.

Известно, что нестехиометрический нитрид кремния, обладающий большим количеством дефектов, имеет способность проводить электрический ток. В слабых электрических полях ( $<10^3$  В/см) проводимость диэлектрика описывается эффектом Френкеля, в сильных преобладают токи ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ) [1]. Известно, что в нестехиометрическом нитриде кремния существуют дефекты, представляющие собой атомы кремния с оборванной связью (*K*-центр) [2]. Энергетические уровни таких дефектов расположены вблизи середины запрещенной зоны (рис. 2б) и играют роль глубоких ловушек для электронов. Логично предположить, что таких дефектов будет больше в нитриде кремния с избытком кремния. Следовательно, более слабую проводимость образца *A*, можно объяснить захватом инжектированных электронов глубокими ловушками. С другой стороны, *K*-центры являются центрами излучательной рекомбинации. Основываясь на модели излучательных переходов [3], можно предположить, что широкая полоса ФЛ для исходного образца *A*, обусловлена переходом между «хвостами» зон проводимости и уровнем *K*-центров. Отсутствие сигнала ФЛ для образца *B* можно объяснить большей шириной запрещенной зоны для нитрида кремния с избытком азота [2]. В этом случае не достаточно энергии излучения лазера, чтобы возбудить электроны из валентной зоны в зону проводимости. После отжига нитрида, глубоких ловушек, захватывающих носители заряда, становится меньше, и проводимость нитрида растет для обоих образцов. ФЛ образцов после отжига также можно объяснить наличием дефектов. В случае образца *B* с избытком азота, отжиг может приводить к формированию, так называемых *N*-центров, уровни которых располагаются ближе ко дну валентной зоны. Таким образом, ФЛ для отожженных образцов можно связать с рекомбинаций между энергетическим уровнем *K*-центров и уровнем «хвостовых» состояний валентной зоны (образец *A*) или уровнем *N*-центров (образец *B*).

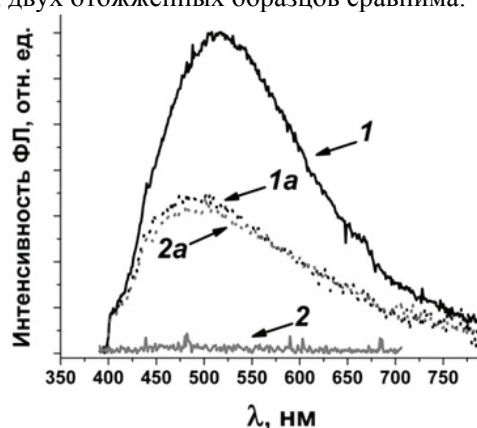


Рис. 1. Спектры ФЛ исходных (кривая 1 и 2) и отожженных (кривая 1а, и 2а) образцов А (кривая 1 и 1а) и В (кривая 2 и 2а)

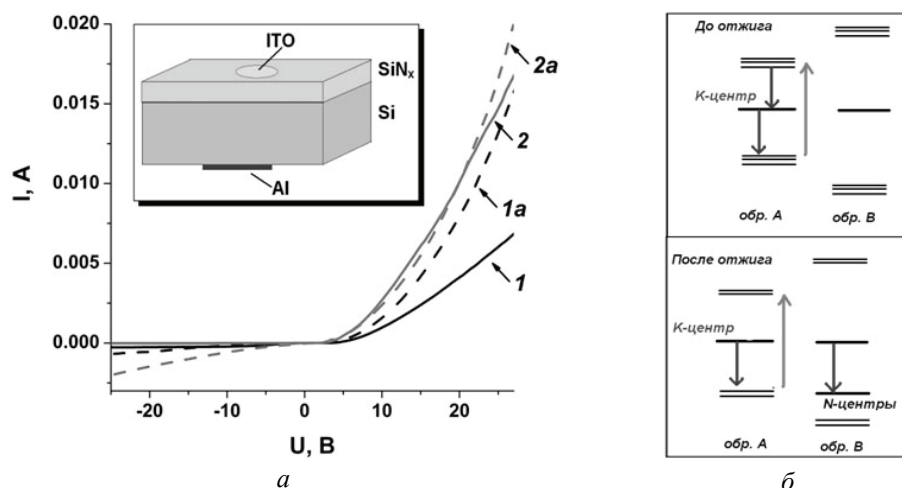


Рис. 2. ВАХ (а) исходных (кривая 1 и 2) и отожженных (кривая 1а, и 2а) образцов А (кривая 1 и 1а) и В (кривая 2 и 2а) и схема энергетических уровней (б)

Таким образом, проведен сравнительный анализ люминесцентных и электропроводящих свойств нестехиометрических пленок нитрида кремния с избытком кремния и азота. Установлено, что для исходных структур интенсивность фотолюминесценции выше, а проводимость ниже в случае пленки нитрида кремния с избытком кремния ( $x=1$ ). После отжига при температуре 800 °С проводимость пленок увеличивается для двух образцов. Спектры ФЛ отожженных структур сравнимы по интенсивности и имеют одинаковую форму. Для объяснения механизмов проводимости и фотолюминесценции была использована модель дефектных состояний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Li, D. Electrically tunable electroluminescence from  $\text{SiN}_x$ -based light-emitting devices / D. Li, F. Wang, D. Yang, D. Que // Optics Express. 2012. V. 20. №. 16. P. 17360.
2. Robertson, J. Nature of the Si and N dangling bonds in silicon nitride / J. Robertson, W.L. Warren, J. Kanicki // Journal of Non-Crystalline Solids. 1995. V. 187. P. 297.
3. Deshpande, S.V. Optical properties of silicon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition / S.V. Deshpande, E. Gulari, S.W. Brown, S.C. Rand // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. P. 6534.

### КВАНТОВЫЙ ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИЯ В ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НИТРИДОВ

В. К. Кононенко

Белорусский государственный университет, vklavik@gmail.com

Мощные светодиоды и лазеры на основе широкозонных соединений – нитридов используются в системах освещения, записи информации и печати, для конверторов излучения и оптической накачки, а также в устройствах безопасности, для медицинских, военных и других целей [1]. Основная задача при разработке излучателей – это повышение КПД и надежности, расширение спектрального диапазона, поиск новых материалов и оптимизация характеристик структур.