

УДК 537.534.35

## ВЛИЯНИЕ ПРЯМОЙ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ИОНОВ 12-30 кэВ НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$ .

**Григоренко И.Н.** (Университет ИТМО; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук), **Митрофанов М.И.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук; Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных Российской академии наук), **Лиля А.С.** (Университет ИТМО)

**Научный руководитель – к.т.н. Вознюк Г.В.**

(Университет ИТМО; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук)

Исследована зависимость глубины формирования радиационных дефектов в двойной гетероструктуре  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$  от энергии ионов при прямой ионно-лучевой литографии в диапазоне 12–30 кэВ. Экспериментальные и расчётные данные показывают, что с увеличением энергии ионов увеличивается концентрация и глубина распространения радиационных дефектов. При изменении энергии ионов от 15 до 30 кэВ не изменяет скорость травления. Показано, что низкотемпературный отжиг позволяет удалить аморфизированный поверхностный слой без восстановления радиационных дефектов. Обнаружено, что при ионно-лучевой литографии с энергиями ионов более 15 кэВ реальная глубина формирования радиационных дефектов отличается от рассчитанной в программе SRIM и составляет более 900 нм.

**Введение.** Основными областями применения метода прямой литографии сфокусированным ионным пучком (СИП) являются подготовка образцов для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [1], локальный анализ, травление и напыление материалов [2], а также изготовление зондов для атомно-силовой микроскопии АСМ [3]. В последнее время прямая ионно-лучевая литография всё чаще стала применяться для изготовления элементов нанофотоники. [4,5]. Метод позволяет осуществлять безмасочную литографию с субмикронным разрешением [4,5]. Недостатком метода является то, что в процессе литографии образуются радиационные дефекты, являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации, которые приводят к тушению люминесценции. Данный факт ограничивает применение метода СИП при работе со светоизлучающими структурами. В работе [6] показано, что термический отжиг даёт возможность значительно снизить количество радиационных дефектов и практически полностью восстановить люминесцентные свойства светоизлучающих гетероструктур. В тоже время зависимость квантового выхода фотолюминесценции от энергии ионов при литографии СИП мало изучена. В настоящей работе приведены результаты влияния энергии ионов в диапазоне 12-30 кэВ на глубину формирования радиационных дефектов при травлении двойной гетероструктуры  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$ .

**Основная часть.** В качестве объекта для исследования была выбрана двойная гетероструктура  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$  с толщинами слоев по 1 мкм каждый. Для оценки влияния энергии ионов на скорость травления гетероструктуры был сформирован массив квадратных отверстий с различными глубинами с энергиями ионов Ga 12-30 кэВ. Увеличение глубины отверстий осуществлялось за счёт увеличения ионной дозы. Глубина отверстий измерялась на атомно-силовом микроскопе. Сравнение зависимостей глубин отверстий, вытравленных при разных энергиях, от ионной дозы показала, что изменение энергии ионов в диапазоне 15-30 кэВ не приводит к изменению глубины вытравленных отверстий, а энергия ионов 12 кэВ приводит к уменьшению глубины ~ в 1.15 раза и как следствие приводит к снижению скорости травления. Результаты моделирования зависимости коэффициента распыления от энергии ионов в программе SRIM подтверждают экспериментальные результаты. Показано что,

зависимость коэффициента распыления слоя  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$  от энергии ионов  $\text{Ga}^+$  приходит в насыщение при энергии ионов более 15 кэВ. Для оценки концентрации и глубины распространения радиационных дефектов использовался метод фотолюминесцентной спектроскопии с подбарьерным возбуждением. Источником накачки являлся полупроводниковый лазер с длиной волны 808 нм. Плотность мощности фотовозбуждения составляла  $1.5 \text{ кВт/см}^2$ , диаметр лазерного пучка составлял 80 мкм. Был сформирован набор квадратных отверстий с энергиями ионов 15-30 кэВ. Глубина отверстий составляла 100 нм, ионная доза  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ . После травления образец отжигался в вакуумной камере при давлении  $10^{-5} \text{ Па}$  в течение 20 минут при температуре  $300^\circ\text{C}$ . Такой режим отжига позволил удалить аморфизированный поверхностный слой без восстановления радиационных дефектов. Величина сигнала фотолюминесценции с травлёных областей при энергии 15 кэВ в 3 раза больше чем при 30 кэВ. Полученные результаты подтверждаются модельным расчётом в программе SRIM. Показано, что концентрация и глубина распространения дефектов возрастает с увеличением энергии ионов. Однако глубина распространения дефектов, полученная в SRIM, различается с экспериментальными данными более чем в 10 раз, что связано с ограничениями программного пакета SRIM.

**Выводы.** Результаты исследования показали, что скорость травления слоев  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$  практически не зависит от энергии ионов в сфокусированном ионном пучке в диапазоне энергий 15–30 кэВ. При этом глубина формирования радиационных дефектов резко возрастает с ростом энергии ионов  $\text{Ga}^+$ . Обнаружено, что при травлении СИП с энергиями ионов более 15 кэВ глубина формирования радиационных дефектов превышает 900 нм, что не соответствует расчетам в программе SRIM. При проведении прямой ионно-лучевой литографии сфокусированным ионным пучком  $\text{Ga}^+$  на светоизлучающих структурах целесообразно использовать энергии ионов  $<15 \text{ кэВ}$ , в отличие от традиционно применяемых 20–30 кэВ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-12-00304, <https://rscf.ru/project/21-12-00304/>

#### Список использованных источников:

1. Mayer J., Giannuzzi L.A., Kamino T., Michael J. TEM Sample Preparation and FIB-Induced Damage // MRS Bulletin. – 2007. - №32. - P. 400 – 407.
2. Li P., Chen S., Dai H., Yang Z., Chen Z., Wang Y., Chen Y., Shan W., Peng W., Duan H. Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: fundamentals and applications // Nanoscale. – 2021. - №13. – P. 1529 – 1565.
3. Machalett F., Seidel P. Focused Ion Beams and Some Selected Applications // Digital Encyclopedia of Applied Physics. – 2019.
4. Holguin-Lerma J.A., Ng T.K., Ooi B.S. Narrow-line InGaN/GaN green laser diode with high-order distributed-feedback surface grating // Appl. Phys. Express. – 2019. - №12. – P. 042007.
5. Yoshida M., Zoysa M.D., Ishizaki K., Kunishi W., Inque T., Izumi K., Hatsuda R., Noda S. Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR // J. Phys. Photonics. – 2021. - №3. – P. 022006.
6. Voznyuk G. V., Grigorenko I. N., Mitrofanov M. I., Nikolaev D. N., Mizerov M. N., Evtikhiev V. P. Photoluminescence Study of AlGaAs/GaAs after Focused Ion Beam Milling // Semiconductors. – 2020. - №54(14). - P. 1869-1872.