

УДК 539.23

Н.А. ИВАНОВ, В.Л. ПАПЕРНЫЙ**, Л.И. ЩЕПИНА***, И.Я. ЩЕПИН*****ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ФТОРИСТОГО ЛИТИЯ С НАНОСТРУКТУРАМИ**

Представлены результаты исследования электрических характеристик (энергии активации носителей заряда, ВАХ) приповерхностного слоя кристалла LiF имплантированного ионами Mg. Определена глубина залегания электронных ловушек от дна зоны проводимости, проведена оценка их концентрации по результатам измерения ВАХ. Методом СЗМ обнаружены упорядоченные агломераты (размером в поперечнике не превышающие 1 μm), образованные нанокластерами магния. Близость значений концентрации ловушек, оцененной по результатам измерения поверхностного тока, с концентрацией нанокластеров магния свидетельствует о том, что этими ловушками являются нанокластеры магния.

Ключевые слова: нанокластеры магния, поверхностная проводимость, вольт-амперные характеристики.

Резистивные устройства памяти (RRAM) привлекают внимание многих исследователей, благодаря простоте изготовления, высокому потенциалу запасаения информации (мультибиты), энергонезависимой природе. Апробировано большое количество оксидов переходных металлов, таких как NiO, ZnO, TiO₂, AlO_x, с целью выяснения возможности их использования в устройствах RRAM [1]. Среди этих материалов широкозонный полупроводник ZnO считается наиболее перспективным для этих целей. Устройства памяти на основе ZnO в структурах типа Au/ZnO/ITO (ITO – стекло на основе оксидов индия и олова) показывают высокое соотношение сопротивлений в режиме «включено» (R_{on}) и «выключено» (R_{off}): ($R_{\text{on}}/R_{\text{off}}$) $\sim 10^4$ [2]. Проведенные нами предварительные исследования электрических свойств кристаллов LiF, имплантированных ионами Mg, показали примерно такое же соотношение сопротивлений. Следует отметить, что чем больше концентрация нанокластеров (НК) магния в приповерхностном слое кристалла, тем выше соотношение сопротивлений. Представленные в работе результаты по электропроводности приповерхностных слоев кристаллов фтористого лития, имплантированных ионами магния, дают представление о природе наблюдаемых свойств этих структур.

Объектами исследования являлись кристаллы фтористого лития, имплантированные ионами Mg⁺ с энергией частиц ~ 100 кэВ и флюенсом $1,6 \cdot 10^{17}$ – $3,2 \cdot 10^{17}$ см⁻². С данной энергией глубина проникновения ионов магния в кристалл составляет порядка 100 нм. Для формирования нанокластеров (НК) магния кристаллы подвергались отжигу при 650 К в течение 15 мин. Контроль над образованием НК осуществлялся методом оптической спектроскопии по полосе поверхностного плазмонного резонанса (ППР) с максимумом ~ 285 нм в спектре поглощения. Относительная концентрация кластеров магния оценивалась по оптической плотности (D) в полосе ППР, интенсивность которой менялась от 0,3–2,55. Снимки поверхности кристалла LiF, имплантированного ионами магния, проводились на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) SOLVER P47-PRO с использованием контилевера NSG01, предназначенного для полуконтактных исследований. Для изучения электрофизических характеристик на поверхность имплантированного слоя наносились верхние серебряные электроды с зазором 1 мкм. Измерения температурных зависимостей поверхностной проводимости и ВАХ проводили по стандартной методике с использованием классической схемы Кюри в вакууме с остаточным давлением $2 \cdot 10^{-4}$ мм Hg. Ток измерялся с помощью усилителя постоянного тока У5-11.

С помощью описанной выше методики выполнены исследования температурных зависимостей поверхностного тока (I_s) (рис. 1). Имплантированный слой кристалла обладает повышенной проводимостью по сравнению с неповрежденной поверхностью. Уровень проводимости зависит от концентрации магниевых НК. Чем больше концентрация, тем выше значение поверхностного тока (рис. 1, кривые 1, 2). Участок с энергией активации 0,3 эВ обусловлен появлением электронной компоненты проводимости за счет имплантации кристалла ионами магния. Это значение характеризует глубину энергетического уровня от дна зоны проводимости, образованного электронной ловушкой, по всей вероятности связанной с НК магния [3]. На рис. 2 представлены ВАХ, построенные в двойных логарифмических координатах, для имплантированного кристалла LiF. По наклону начального участка можно определить характерную энергию распределения ловушек E_0 :

$\text{tg}\alpha = l + 1 = 2,66$, в свою очередь $l = E_0 / kT$ [5]. Подставив численные значения $l = 1,66$, получаем $E_0 = 0,042$ эВ. Скорее всего, такие ловушки могут быть образованы поверхностными состояниями нанокластеров магния, а более глубокие (0,3 эВ) НК магния в приповерхностном слое толщиной 100 нм. Наклон начального участка (рис. 2, кривая 2) ВАХ для слабых полей близок к наклону кривой, аппроксимируемой кубической зависимостью (рис. 2, кривая 1). Кубическая зависимость характерна режиму инжектированной плазмы, то есть имеет место одновременная инжекция электронов и дырок, которые в значительной степени нейтрализуют друг друга. Подтверждением этому является участок отрицательной дифференциальной проводимости на зависимости $\lg(I_s) = f(\lg U)$ (рис. 2, кривая 3) наблюдаемый при понижении температуры измерения до 223 К.

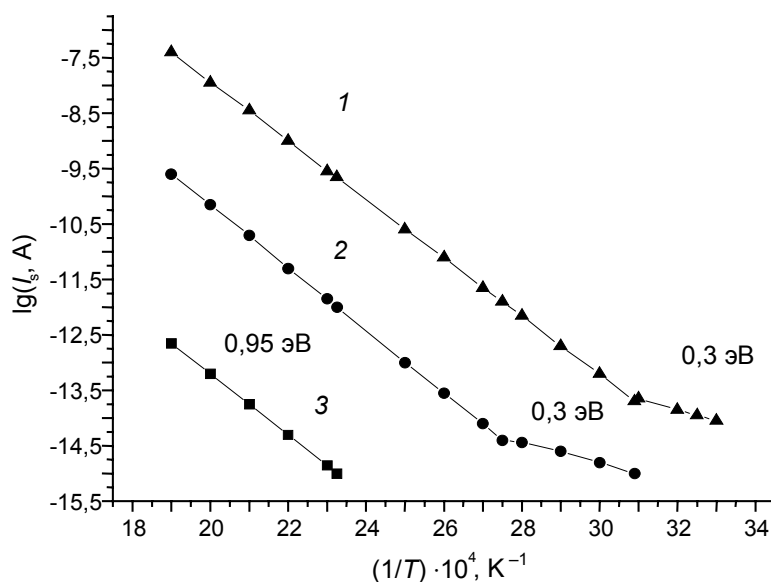


Рис. 1. Температурные зависимости поверхностного тока кристаллов LiF, имплантированных ионами Mg^+ с различной концентрацией нанокластеров магния: $D = 1,9$ (1); $1,45$ (2); и неимплантированный слой (3)

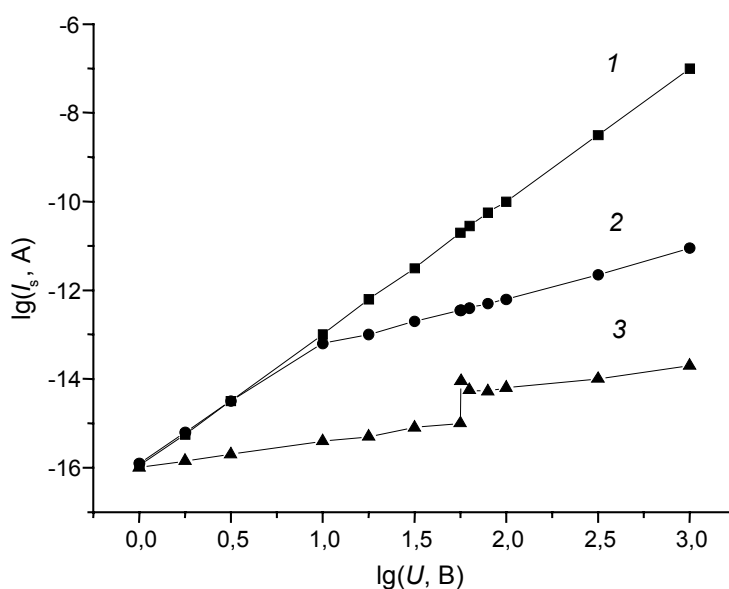


Рис. 2. ВАХ кристалла LiF, имплантированного ионами Mg^+ ($D = 2,17$) в двойных логарифмических координатах: 1 – теоретическая кривая, аппроксимируемая ($I \sim U^3$); 2 – температура измерения 293 К; 3 – 223 К

Следующий участок кривой 2 на рис. 2 может быть описан законом Ома: $I = en_0\mu U/L$. Это означает, что на поверхности имплантированного слоя имеются равновесные носители с концентрацией (n_0), источником которых может быть группа очень мелких доноров, коими, по всей вероятности, и являются поверхностные состояния нанокластеров магния. Анализ кривой 3 (рис. 2) ВАХ при температуре 223 К показывает отклонение от закона Ома. Это происходит в большинстве случаев тогда, когда уровень Ферми перемещается в запрещенной зоне вверх на расстояние ($\sim kT$) от равновесного уровня Ферми. Известно, что это происходит при понижении температуры. Вертикальный участок, который наблюдается на кривой 3 при $U = 60$ В, характеризует состояние, именуемое пределом заполнения ловушек (ПЗЛ). Когда $U = U_{\text{ПЗЛ}}$, квазиуровень Ферми пересекает уровень ловушки. При этом $U_{\text{ПЗЛ}} \approx eN_t L^2/\epsilon$ [4], где L – расстояние между анодом и катодом равное 1 мм; $\epsilon = 9,01$. Из этого соотношения можно оценить концентрацию ловушек, которое в нашем случае составляет $N_t \sim 2,9 \cdot 10^7 \text{ мм}^{-2}$.

На рис. 3 представлено изображение поверхности имплантированного ионами магния слоя кристалла LiF, полученное методом СЗМ. Видны упорядоченные агломераты размером в поперечнике, не превышающие ~ 1 мкм, образованные нанокластерами магния (размер которых колеблется от 100 до 200 нм). Учитывая площадь зазора между электродами при измерении проводимости $S = 10 \text{ мм}^2$ и результаты подсчета количества нанокластеров на поверхности, представленного кадра СЗМ-изображения $5 \times 5 \text{ мкм}^2$, мы приходим к выводу, что на данной площади может быть зарегистрировано $\sim 3,08 \cdot 10^7 \text{ мм}^{-2}$ НК. Как мы видим, концентрация ловушек, оцененная по результатам измерения поверхностного тока, близка по значению к концентрации нанокластеров, обнаруженных на поверхности имплантированного ионами магния кристалла LiF методом СЗМ.

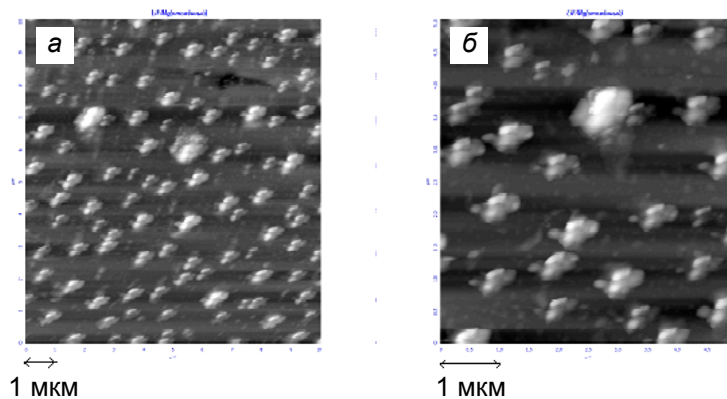


Рис. 3. Изображение поверхности кристалла LiF, имплантированного ионами Mg, после отжига, полученное методом СЗМ: *a* – $10 \times 10 \text{ мкм}^2$; *б* – $5 \times 5 \text{ мкм}^2$

Таким образом, на основании экспериментальных результатов, представленных в работе, можно сделать следующие выводы:

1. Наличие полосы поверхностного плазмонного резонанса в спектре поглощения на $\lambda = 285$ нм исследуемых структур и участка на ВАХ, аппроксимируемого кубической зависимостью, а также участка отрицательной дифференциальной проводимости свидетельствуют о режиме инжектированной плазмы.

2. ВАХ, построенная в двойном логарифмическом масштабе, имеет линейный участок. Это означает, что на поверхности имплантированного слоя имеются равновесные носители с концентрацией n_0 , источником которых может быть группа очень мелких доноров, которыми, по всей вероятности, и являются поверхностные состояния нанокластеров магния ($E_0 = 0,042$ эВ).

3. По температурной зависимости поверхностного тока определена глубина залегания ловушек, находящихся в приповерхностном слое кристалла, от дна зоны проводимости ($\sim 0,3$ эВ). Близость значений концентрации ловушек, оцененной по результатам измерения поверхностного тока, с концентрацией нанокластеров магния, определенных методом СЗМ, свидетельствует о том, что этими ловушками являются нанокластеры магния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schroeder H., Pandian R., Miao J. // Phys. Stat. Sol.(a). – 2011. – V. 208. – P. 300–316.
2. Wang H.J., Zou C.W., Zhou L., et al. // Phys. Stat. Sol. (RRL). – 2011. – V. 5. – P. 223–225.
3. Иванов Н.А., Паперный В.Л., Щепина Л.И., Щепин И.Я. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 2/2. – С. 150–155.
4. Чучмай И.А., Хохлов А.Ф., Машин А.И. и др. // Изв. вузов. Электроника. – 1999. – № 5. – С. 15–20.
5. Райкерус П.А. Электропроводность тонких диэлектрических пленок. – Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1984. – 150 с.

*Национальный исследовательский

Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия

**Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

***НИИПФ ИГУ, г. Иркутск, Россия

E-mail: ivnik@istu.edu

Поступила в редакцию 17.07.13.

Иванов Николай Аркадьевич, начальник отдела лазерной физики и нанотехнологий;

Паперный Виктор Львович, профессор, зав. каф. космофизики;

Щепина Лариса Иннокентьевна, ст. науч. сотр. лаб ЛКФЛС;

Щепин Иннокентий Яковлевич, студент.