

кристалл-припой и в слое припоя (R3-R4). В транзисторах КТ817А/н.п. наблюдаются наибольшие изменения  $R_{th}$  в диапазоне R4-R5, что свидетельствует о наличии объемных дефектов в слое припоя или при расслоении рамки выводной.

#### Выводы.

1. Измеренное  $R_{jc}$  в партии (100 шт.) транзисторов КТ817Г/Интеграл составляет 4,35-4,62 °C/Вт, один аномальный  $R_{jc} = 9,5$  °C/Вт.

2. Рост  $R_{jc}$  достигает в транзисторах КТ817Г/Интеграл 3,2% при увеличении температуры  $T$  пайки от 280°C до 380°C и - 2,2% при уменьшении числа периодов колебаний инструмента  $N_{xy}$  от 10 до 1. Корреляция между  $R_{jc}$  и диаметром иглы при этом слабая. Наименьший уровень теплового сопротивления достигается при  $N_{xy} = 10$ ,  $T = 280$ °C.

3. Измеренное  $R_{jc}$  в партии (10 шт.) транзисторов КТ817А/н.п. находится в диапазоне 8,2-10°C/Вт, все аномальные.

4. Измеренное  $R_{jc}$  в партии (5 шт.) транзисторов 2N5191/ST равно 5,26-5,56 °C/Вт, транзисторов MJD44H11/ON – 2,43-2,64 °C/Вт.

5. В транзисторах КТ817А/н.п. основной тип дефектов – сквозные полости в области припоя, во всех остальных транзисторах – отслоение припоя на границе кристалл–припой.

1. Васьков, О.С. Определение и сопоставление тепловых параметров полупроводниковых диодных излучателей / О.С.Васьков, В.К.Кононенко, В.С.Нисс // Сб. докл. Междунар. науч. конф. “Актуальные проблемы физики твердого тела”. - Минск, 2011. - Т. 1. - С. 82–84.
2. Турцевич, А.С. Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс-спектрометром / А.С. Турцевич [и др.] // ТКЭА. - 2012. № 5. - С. 44–47.
3. Васьков, О.С. Тепловые параметры мощных светодиодов / О.С.Васьков, В.К.Кононенко, В.С.Нисс // Материалы. IX Междунар. науч. конф. “Лазерная физика и оптические технологии” / в 2 ч. - Гродно, 2012. - Ч. 2. - С. 15–18.
4. Gulino, R. Application Note / R.Gulino // AN1703. - 2003. – P. 5-6.

УДК 681.2

### СОЗДАНИЕ ВЫСОКОСОВЕРШЕННЫХ И ВЫСОКОЧИСТЫХ СТРУКТУР КРЕМНИЯ

Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Челябинский А.Р.<sup>1</sup>, Садовский П.К.<sup>1</sup>, Турцевич А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь

Обеспечение химической чистоты и кристаллического совершенства монокристаллов кремния и создаваемых структур является одной из важнейших задач в микроэлектронном производстве. Ионная имплантация примесей является мощным источником дефектов в кремнии. Подавление образования в ионно-имплантированных слоях кремния при отжиге из точечных радиационных дефектов остаточных протяженных нарушений является актуальной задачей полупроводникового материаловедения. Остаточные нарушения (стержнеобразные дефекты, дефекты упаковки, дислокационные петли) вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния и значительно ухудшают параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем. Пошаговый метод имплантации ионов легирующих примесей допороговой дозой (для ионов бора  $1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) с промежуточными термическими отжигами позволяет получать бездефектные слои кремния [1].

Для уменьшения числа операций имплантация-отжиг эффект пороговой дозы совмещен нами [2] с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения, используя явление Воткинса. Явление заключается в вытеснении легирующих примесей В, Al, Ga из узлов решетки в междоузлия возникающими при облучении

кремния высокоэнергетичными электронами, нейтронами или ионами междоузельными атомами кремния. Замещение атомов бора междоузельными атомами Si имеет место и при термообработке имплантированного кремния [1]. При отжиге источником междоузельных атомов Si являются комплексы типа Si-B3, распадающиеся при температурах около 500 °C. В предложенном в работе [2] методе пошагового легирования используется термоотжиг в печи.

После каждого шага имплантации и отжига при последующей имплантации необходимо подавить эффект Воткинса, чтобы сохранить атомы бора в узлах решетки. Для этого имплантацию бора проводили при плотностях тока порядка 1 мкА·см<sup>-2</sup>, обеспечивающих высокий уровень ионизации, за счет чего эффект Воткинса подавляется, и атомы бора не вытесняются из узлов. Эти атомы бора служат ловушками для атомов Si при последующем отжиге. Следовательно, доза каждого последующего шага может быть в 2 раза выше предыдущей (эффективность введения междоузельных устойчивых комплексов типа Si-B3, из которых строятся остаточные нарушения, при имплантации бора примерно равно 1). Применение предложенного нами пошагового метода имплантации и термоотжига в печи позво-

лило получать бездислокационные слои кремния при существенно меньшем количестве шагов по сравнению с известным пошаговым методом.

Нами выполнены исследования по образованию остаточных нарушений в кремнии при пошаговой имплантации и быстром термическом (БТО) отжиге. Исследования пошагово-имплантированных слоев кремния при различных режимах лампового отжига (скорость набора температуры, двухступенчатый отжиг, отжиг с планарной и обратной сторон пластины) показали отсутствие положительного эффекта по подавлению протяженных нарушений, что объясняется более высокой мгновенной концентрацией междоузельных атомов кремния в слое внедрения при БТО по сравнению с термоотжигом в печи вследствие существенного различия в скоростях нагрева и распада междоузельных комплексов.

Помимо пошагового метода известен и другой достаточно эффективный метод подавления образования остаточных нарушений в имплантированном кремнии. В основе этого метода лежит дополнительное легирование слоев кремния углеродом. Атом углерода, как и все другие примеси замещения с отличным от матрицы ковалентным радиусом является центром аннигиляции для междоузельных атомов Si через эффект Воткинса. Эффективность атома С как центра аннигиляции дефектов может быть больше 1. И это действительно наблюдалось экспериментально. Атом С, вытесненный из узла атомом Si, может затем захватиться на вакансию и снова участвовать в аннигиляции междоузельных атомов кремния.

Очевидно, что более эффективно углерод будет работать в качестве ловушки междоузельных атомов кремния, располагаясь в узлах решетки. Равновесная растворимость углерода по узлам решетки кремния невелика –  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Однако в имплантированных слоях при высоких концентрациях избыточных вакансий его растворимость повышается на несколько порядков величины. Термообработку при этом необходимо проводить импульсными методами. Нами установлено, что локализация атомов С по узлам и междоузлиям непосредственно при имплантации зависит от уровня ионизации в слое внедрения и может управляться плотностью тока ионного пучка. При плотности тока ионов сканирующего луча 1-2 мкА.см<sup>-2</sup> практически весь внедренный углерод располагается в узлах решетки кремния, и термообработка для этого не требуется.

Остаточные примеси, в особенности переходные металлы (Cu, Fe, Au, Ni, Co и др), вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния и являются центрами безызлучательной рекомбинации.

Эффективными геттерами в кремнии являются слои пористого кремния. Они создаются преимущественно на нерабочей стороне пластины путем имплантации ионов H<sup>+</sup> либо He<sup>+</sup> дозами  $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и последующих термообработок, обеспечивающих образование микрополостей. Затем диффундирующие по кристаллу примеси захватываются на оборванные связи внутренних стенок микрополостей. Примеси в виде металлосилицидов могут также заполнять их внутренний объем. Для реализации способа необходимо использовать специальное дорогостоящее оборудование для имплантации ионов водорода либо гелия.

Нами предложен [3] метод создания геттера в виде слоя пористого кремния путем имплантации стандартной для микроэлектронного производства примеси. Предлагается использовать имплантацию ионов Sb – штатной легирующей примеси. Предпосылкой для создания геттера в виде слоя пористого кремния является зависимость предела растворимости легирующих примесей от температуры термообработки. Из всех электрически активных примесей в кремнии сурьма обладает самым низким пределом растворимости.

Для формирования геттерного слоя пластины кремния имплантируются ионами Sb<sup>+</sup> дозой  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Предварительно для создания защитного слоя окисла пластины отжигались при температуре 850 °С в атмосфере кислорода в течение 15 минут. Затем для электрической активации внедренной примеси проводилась термообработка при температуре 1000 °С в течение 30 минут в атмосфере азота. Степень электрической активации в результате отжига при 1000 °С составляла 21%. Остальная часть примеси вследствие превышения предела растворимости в кремнии выпадает в виде включений второй фазы. Размеры этих включений составляют 10-20 нм. Встречаются включения размерами 25-30 нм. Образование второй фазы характерно для кремния, сильно легированного сурьмой. При дозе  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и энергии ионов 60 кэВ объемная концентрация сурьмы на полувысоте профиля распределения составляет  $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что на порядок превышает предел ее растворимости в кремнии при температуре отжига 1000 °С.

Пластины со сформированными включениями второй фазы сурьмы отжигались затем в атмосфере азота при температуре 1220 °С в течение 4 часов. Электронные микрофотографии слоев кремния, легированных сурьмой и прошедших эту термообработку, демонстрируют мозаичную структуру из светлых областей размером около 20-30 нм, встречаются области размерами 40-50 нм. Образование мозаичной структуры объясняется распадом преципитатов сурьмы при повышении температуры до 1220 ° и

диффузией атомов сурьмы в объем кристалла. Выполненные измерения слоевой концентрации носителей заряда показали, что электрическая активация примеси в этих слоях составляет 100%. Распад преципитатов и диффузия из них атомов сурьмы оставляет на их месте микропустоты. Исследования показали высокую эффективность сформированного слоя пористого кремния как геттера. Время жизни неравновесных носителей заряда в кристаллах с созданным геттером в 3-4 раза выше по сравнению с исходными значениями.

УДК 621.396:535.8

## АПЕРТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ LC-МОДУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ ПЛАНАРНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Развин Ю.В., Потачиц В.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В работе приведены результаты исследования электрооптических параметров световых клапанов жидкокристаллических (LC) модуляторов оптического излучения, работающих в режиме планарного переключения (in plane switching mode – IPS).

Исследования и использование режима планарного переключения связаны прежде всего с развитием технологии TFT-LC дисплеев [1-2]. В этих работах рассмотрены вопросы влияния топологии электродов, характеристик LC на передаточные параметры IPS-дисплеев. В [2] показано, что в таких условиях могут возникать, так называемые, “суперординарные” домены в жидкокристаллическом слое. Формирование таких доменов существенно зависит от угла преднаклона LC-молекул в топологической структуре электродов. Исследование данного режима IPS в модулирующей планарно-интегрированной LC-структуре, как мы ожидаем, позволит не только детально изучить процессы развития возникающих искажений в LC-слое, но и значительно расширить функциональные возможности таких структур.

Рассмотрим следующую модель исследуемого образца LC-модулятора в виде планарной структуры с гомеотропной ориентацией молекул нематического жидкого кристалла (NLC).

Электроды анализируемой структуры направлены вдоль оси  $x$  - перпендикулярно плоскости рисунка (рис.1). Анализ проведем для NLC с положительной диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon > 0$  ( $\Delta\epsilon = \epsilon_\tau - \epsilon_n$ ). Параметры  $\epsilon_\tau$  и  $\epsilon_n$  определяют диэлектрические проницаемости в направлениях параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации жидкокристаллических молекул.

1. Челядинский А. Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии. УФН. 2003. Т. 173. №8. С. 813.
2. В.И. Плебанович, А.И. Белоус, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния. ФТТ, 2008. т.50. в.8. с. 1378-1382.
3. П.К. Садовский, А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев, М.И. Тарасик, А.С. Турцевич, Ю.Б. Васильев. Создание геттера в кремнии путем имплантации ионов сурьмы. ФТТ. 2013. т.55. в.6. 1071-1073.

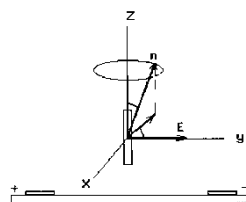


Рисунок 1 – Положение NLC-молекул в световом клапане в режиме IPS- переключения

При приложении к электродам управляющего электрического поля  $E$  межэлектродная область (апертура клапана) разбивается на два эквивалентных домена. Причиной возникновения этих доменов является различный преднаклон LC-молекул на границах клапана. Граничная область между этими доменами представляет собой стенку, определяемую параметрами перехода Фредерикса. NLC- молекулы в этой области сохраняют начальную гомеотропную ориентацию.

Ограничимся случаем малых начальных искажений, когда возникающая деформация директора LC-слоя  $n$  может быть представлена следующим образом:

$$n_x = 0 \quad n_y = \sin \varphi \approx \varphi \quad n_z = \cos \varphi \approx 1 .$$

Тогда плотность свободной энергии Франка для такого LC-слоя в одноконстантном приближении записывается в виде:

$$F = k/2[(\operatorname{div} n)^2 + (\operatorname{rot} n)^2], \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент упругости

С учетом рассматриваемой геометрии модели выражение (1) преобразуется в более простую форму:

$$F = \left(\frac{k}{2}\right) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 . \quad (2)$$