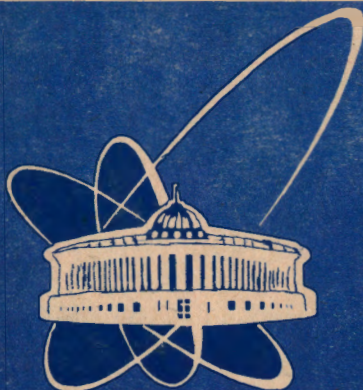


97-71



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-71

P14-97-71

А.Г.Захаров\*, В.С.Вариченко\*, А.Ю.Дидык

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА  
НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ  
ИОННО-ОБЛУЧЕННОГО АЛМАЗА

---

\*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

1997

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетичная ионная имплантация является эффективным методом контролируемого примесного легирования алмаза [1], что обуславливает актуальность изучения особенностей дефектообразования в имплантированных полупроводниках. В приповерхностной (толщиной до нескольких микрон) области алмазов, имплантированных ионами высоких энергий, отмечается аномальное распределение многих оптических центров. Вследствие этого из рассмотрения процессов, дефектообразования, как правило, исключают этот слой. Однако изучение распределения интенсивности центров люминесценции в этой области может обеспечить получение дополнительных сведений о процессах дефектообразования в алмазе, облученном высокоэнергетичными ионами. Предполагается, что основной причиной наблюдаемых особенностей являются неравновесные явления, сопровождающие процесс установления зарядового состояния иона при его торможении в приповерхностном слое кристалла [2].

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы для исследований представляли собой пластинки природного алмаза типа IIa (концентрация азота менее  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) и типа Ia (содержание азота  $10^{18}$ - $10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), вырезанные в плоскости (100).

Образцы имплантировались ионами бора с энергией 13,6 МэВ при флюенсе  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , ионами углерода с энергией 82 МэВ при флюенсе  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , ионами никеля с энергиями 59 МэВ (флюенс -  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и 335 МэВ (флюенс -  $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ).

Изохронный двадцатиминутный отжиг образцов проводился в графитовом контейнере в вакууме  $10^{-4} \text{ Па}$  при температуре  $1400^\circ\text{C}$ . Отжиг под давлением (термобарическая обработка) был выполнен при температуре  $2200^\circ\text{C}$  и давлении  $8,5 \times 10^9 \text{ Па}$  в аппарате высокого давления в течение двух часов.

Пространственное распределение концентрации дефектов и примеси по глубине облученного слоя изучалось при послойном удалении ионно-облученной области.

Катодолюминесценция алмаза возбуждалась пучком электронов с энергией 12 кэВ и плотностью тока  $6 \text{ мкА/мм}^2$  при температуре 80 К и регистрировалась в спектральном диапазоне 300 - 800 нм.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе выполнения работы исследовались кристаллы непосредственно после облучения высокоэнергетичными ионами бора и никеля, а также кристаллы после облучения высокоэнергетичными ионами никеля и углерода и отжига в камере высокого давления.

В приповерхностном слое толщиной 0,2 мкм для алмазов, имплантированных ионами бора, интенсивности центров TR12, GR1, 575 и 389 нм, а также А-полосы претерпевают существенные изменения. В более глубоких слоях регистрируется монотонное изменение их интенсивности.

Абсолютная величина изменения интенсивности этих центров в тонком приповерхностном слое не очень велика, но здесь прослеживается определенная закономерность. Только для таких центров, как А-полоса и 503,2 нм (которые присутствовали в спектре катодолюминесценции данного образца до облучения и которые имеют, следовательно, нерадиационную природу), интенсивность на поверхности меньше, чем в более глубоких слоях. Поскольку дефектность в приповерхностном слое, как следует из сделанных выше замечаний, также больше, то можно говорить о том, что интенсивности центров 503,2 нм и А-полосы связаны обратной зависимостью с концентрацией радиационных нарушений в кристалле. В то же время для четырех центров (TR12, GR1, 389 и 575 нм) наблюдается прямая зависимость, и, следовательно, эти центры имеют радиационную природу: их интенсивность высока только в имплантированном слое.

В свою очередь изменение интенсивности центра H3 по глубине облученного слоя значительнее, а приблизительно постоянный уровень ее достигается на гораздо большей глубине, чем интенсивность А-полосы. Это и понятно, поскольку ослабление люминесценции центров, связанных с А-полосой, обусловлено только появлением дополнительного количества каналов безызлучательной рекомбинации и не связано с уменьшением концентрации самих дефектов - достаточно устойчивых дислокаций. В противоположность этому в приповерхностном слое имеет место разрушение менее стабильных дефектов, связанных с центрами H3, так что ослабление их люминесценции обусловлено еще и этим процессом.

В приповерхностном слое алмаза, имплантированного ионами никеля с энергией 335 МэВ, также отмечается немонотонное распределение интенсивности А-полосы. И в этом случае величина интенсивности А-полосы непосредственно на облученной поверхности значительно ниже, чем в глубине, что свидетельствует о нерадиационном происхождении соответствующих дефектов и связано с появлением дополнительного (по сравнению с более глубокими слоями) числа каналов безызлучательной рекомбинации в приповерхностном слое кристалла при торможении высокоэнергетичного иона. В то же время толщина слоя, в котором ослаблена люминесценция А-полосы, больше и составляет 1 мкм, диапазон изменения ее интенсивности составляет 1,5 порядка величины (для сравнения: в облученном ионами бора алмазе - 1 порядок). Такие отличия могут быть объяснены тем обстоятельством, что тяжелые ионы никеля, содержащие много электронов и обладающие большей, чем ионы бора, энергией, создают в решетке алмаза более радикальные нарушения. Однако даже эти нарушения отжигаются при температуре  $1400^\circ\text{C}$ , и на профиле А-полосы в

приповерхностном слое не отмечается участок с пониженной интенсивностью. Радиационные нарушения, созданные в слое максимума ядерного торможения ионов никеля, не отжигаются после такой обработки.

Влияние термобарической обработки на примесный состав приповерхностной области алмазов изучалось на образцах, имплантированных высокоэнергетичными ионами никеля и углерода.

Образец безазотного алмаза, имплантированный, с одной стороны, ионами никеля с энергией 59 МэВ, а с другой - ионами углерода с энергией 82 МэВ, отжигался при температуре 2200°C. Распределение интенсивности различных оптических центров по глубине облученного слоя обнаруживает участок аномального распределения центров катодолюминесценции в непосредственной близости от облученной поверхности. Например, только в этом слое в обеих частях кристалла присутствует оптический центр с длиной волны 415 нм, в состав которого входят три атома азота [3]. Центр 575 нм также регистрируется только в этой области. Центр НЗ в той части образца, которая имплантирована ионами никеля, ведет себя аналогичным образом, а в той части, которая имплантирована ионами углерода, профиль этого центра условно можно разделить на два участка. До глубины порядка 3 мкм его интенсивность растет, после чего резко спадает на порядок величины и затем уже вновь монотонно увеличивается.

Другая группа центров регистрируется с приблизительно одинаковой интенсивностью как в приповерхностной области, так и на больших глубинах. Так, в облученном ионами никеля слое такое распределение обнаруживают В-полоса, центры 578 и 631 нм. После облучения ионами углерода интенсивность А-полосы ведет себя аналогичным образом.

Наблюдаемое распределение оптических центров, встречающихся исключительно в тонкой приповерхностной области кристалла, может быть результатом диффузионного проникновения в глубь алмаза примесных атомов азота из окружающей шихты в условиях высоких температур и давлений. Действительно, столь сложный центр, как 415 нм, может быть образован только в том случае, если имеются в достаточном количестве атомы азота. При этом существенным фактором является их подвижность, которая, как и температура, приблизительно одинакова во всем облученном объеме кристалла, а центр 415 нм распределен только у поверхности.

Центр 503,2 нм, профиль которого состоит из двух участков, в приповерхностной области также образуется в результате диффузии дополнительного количества атомов азота, в то время как в более глубоких слоях его появление обусловлено доминирующей ролью процессов электронного торможения и ионизацией кристаллической решетки.

Дополнительным аргументом в пользу диффузионного механизма возникновения в приповерхностном слое ряда оптических центров является то, что практически все эти центры азотсодержащие, в то время как центры, которые распределены по всей

глубине облученной области, имеют предположительно междоузельную природу (В-полоса и 578 нм) либо же связаны с дефектами, в состав которых не входят атомы азота (А-полоса, 631 нм).

Интересной представляется форма распределения интенсивности азотсодержащих центров. После имплантации никеля их интенсивность, имеющая максимальное значение на поверхности кристалла, затем постепенно уменьшается. Напротив, в той части, которая была имплантирована ионами углерода с поверхности до глубины порядка 2 мкм, наблюдается постепенное усиление люминесценции, и только после этого - ее ослабление. Такое распределение вполне логично связать с формой кривой энерговыделения в электронных столкновениях, поскольку для ионов никеля с энергией 59 МэВ она также имеет максимум непосредственно на поверхности, в то время как для ионов углерода с энергией 82 МэВ - лишь на глубине 60-70 мкм.

Глубина предполагаемого проникновения из шихты атомов азота после имплантации ионов углерода больше, чем после имплантации ионов никеля (3 и 1 мкм соответственно). В то же время интенсивность энерговыделения, а следовательно и нарушения в кристаллической решетке во втором случае значительно больше.

Одно из возможных объяснений наблюдаемой особенности может быть следующим. Ионы углерода создают в алмазе протяженные дефектные области - треки с пониженной атомной плотностью, что стимулирует диффузию примеси, подобно тому, как это наблюдалось в [4]. Имплантация ионами никеля приводит к перекрытию ионных треков с разрушением их структуры и формирует такую дефектную область в приповерхностном слое, которая не способствует диффузии атомов примеси из шихты.

#### 4. ВЫВОДЫ

Немонотонное изменение интенсивности оптических центров в тонком приповерхностном слое алмаза, облученного высокоэнергетичными ионами, является следствием тех процессов, которые сопровождают внедрение ускоренной частицы в кристаллическую решетку, когда ион теряет часть своих электронов на коротком участке пробега. При исследовании основных закономерностей дефектообразования этот слой может быть исключен из рассмотрения как не несущий информации о процессах ядерного и электронного торможения иона.

Немонотонное изменение интенсивности оптических центров в тонком приповерхностном слое алмаза, облученного высокоэнергетичными ионами и подвергнутого термобарической обработке, является следствием диффузии атомов азота по трекам, созданным имплантируемыми ионами.

Данная работа частично была профинансирована в рамках проекта INTAS-94-1982 и гранта РФФИ 95-02-04885 а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вариченко В.С., Дидык А.Ю., Зайцев А.М., Кузнецов В.И., Кулаков В.М., Мельников А.А., Плотникова С.П., Скуратов В.А., Стельмах В.Ф., Шестаков В.Д. Дефектообразование в алмазе при высокоэнергетичной ионной имплантации // Препринт ОИЯИ 14-86-411, Дубна, ОИЯИ, 1986.

2. Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Федотов С.А. Влияние флуктуации ионного заряда на процесс высокоэнергетичной ионной имплантации: моделирование на основе уравнения Больцмана // Поверхность.Физ.Хим.Мех.,1992, N6, с.53-58.

3. G. Davies (ed) / Properties and Growth of Diamond, INSPEC, London,UK, 1994.

4. Зайцев А.М. Высокоэнергетичная ионная имплантация в полупроводники // Поверхность.Физ.Хим.Мех,1991, N10, с.5-26.

Рукопись поступила в издательский отдел  
4 марта 1997 года.