

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P14-97-72

А.Р.Филипп*, В.С.Вариченко*, А.Ю.Дидык

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
И ПРИМЕСИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ
АЛМАЗА, ОБЛУЧЕННОГО ИОНАМИ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

1997

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективность алмаза как материала полупроводниковой электроники [1,2] обуславливает расширение исследований этого материала, что требует привлечения новых методов исследования.

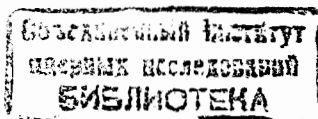
Единственным методом, в настоящее время, который может быть использован для создания на основе алмаза различных полупроводниковых приборов, является ионная имплантация [3]. Однако легирование образца примесью в ходе ионной имплантации приводит также и к образованию дополнительных радиационных дефектов, которые могут оказывать как положительное влияние на работоспособность полупроводниковых приборов, так и отрицательное [4,5].

Учитывая это, исследование ионно-имплантированных алмазов такими неразрушающими методами, как СВЧ-фотопроводимость и оптическое поглощение, представляется весьма актуальным.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния высокотемпературного отжига на дефектную структуру ионно-облученного алмаза.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы природного алмаза типа IIa облучались при комнатной температуре ионами V^+ с энергией 13.6 МэВ и дозой $1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, ионами V^+ с распределенной энергией 20 - 300 кэВ и суммарной дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Высокотемпературный отжиг образцов проводился в графитовом контейнере в вакууме 10^{-4} Па. Запись спектров фотопроводимости выполнялась на установке с использованием СВЧ-резонатора, работающего на частоте 10 ГГц. Неравновесные носители заряда возбуждались модулированным с частотой 300 Гц светом в спектральном диапазоне 250 - 700 нм. Регистрация фотоотклика осуществлялась в режиме синхронного детектирования. Исследование оптического поглощения производилось на спектрофотометре SPECORD M-40. Измерения СВЧ-фотопроводимости и оптического поглощения производились при температуре 300 К.



3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Имплантация ионами B^+ с распределенной энергией 20 - 300 кэВ природного алмаза привела к тому, что в спектральном диапазоне 250-700 нм при измерениях с облученной стороны образцов фотоотклика зарегистрировать не удалось. Высокотемпературный отжиг до 1600°C также не привел к восстановлению фотопроводимости в указанном спектральном диапазоне. При регистрации с необлученной стороны было установлено, что имплантация ионами B^+ с распределенной энергией 20-300 кэВ не повлияла на форму спектра и интенсивность СВЧ-фотопроводимости при длинах волн свыше 250 нм. Запись спектра СВЧ-фотопроводимости образца алмаза, облученного ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ, до облучения не производилась.

В спектрах поглощения облучение приводит к возрастанию поглощения во всем диапазоне исследования, появлению широкой полосы 530 - 730 нм, обусловленной центрами GR и 3H. Отметим, что в спектрах СВЧ-фотопроводимости данные дефекты не были зарегистрированы.

Рассматривая поведение СВЧ-фотопроводимости в спектральном диапазоне 250 - 700 нм при отжиге, необходимо отметить следующее. С отжигом до температуры 900°C СВЧ-фотопроводимость в примесной области ведет себя по-разному для облученных образцов при регистрации с необлученной стороны и необлученного образца. В необлученном образце СВЧ-фотопроводимость практически не изменяет своей интенсивности во всем спектральном диапазоне исследования.

В облученных же образцах регистрируется следующее. В течение отжига при различных температурах интенсивность СВЧ-фотопроводимости на отдельных участках начинает возрастать или уменьшаться, т.е. в различных спектральных областях примесная фотопроводимость ведет себя по-разному в процессе отжига (рис.1). На

данном рисунке показаны спектры СВЧ-фотопроводимости в спектральном диапазоне 250 - 400 нм образца, облученного ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ при различных температурах отжига. Такое поведение обусловлено отжигом и коагуляцией различных радиационных дефектов. Наиболее вероятно, что это дефекты междоузельного типа и собственные дефекты, которые располагаются глубже слоя остановки ионов легируемой примеси бора. Основанием для такого предположения служит тот факт, что примесная фотопроводимость и ее изменения с отжигом наиболее ярко выражены в образце, подвергнутом высокоэнергетичной имплантации. В таком образце слой внутренних напряжений намного шире, чем при обычной имплантации. В то же время ширина слоя, в котором располагается примесь бора, при использовании высокоэнергетичной и полиэнергетичной имплантации оказываются сравнимыми. Если бы при измерениях СВЧ - фотопроводимости в области 250 - 700 нм происходил анализ слоя, в котором находится примесь бора, то следовало бы ожидать, что при отжиге изменения фотопроводимости для образцов, подвергнутых как полиэнергетичной ионной имплантации, так и высокоэнергетичной, будут сходными. Однако при измерениях СВЧ - фотопроводимости регистрируемые изменения в спектрах с изменением температуры отжига более значительны для образца, подвергнутого высокоэнергетичной ионной имплантации. Кроме того, если бы происходил анализ того слоя, в котором залегают примесь, то при регистрации как с облученной, так и с необлученной стороны спектральные зависимости СВЧ - фотопроводимости в примесной области должны быть похожими. Но при регистрации СВЧ - фотопроводимости с облученной стороны фотоотклика в спектральном диапазоне 250 - 700 нм зарегистрировать не удалось.

При увеличении температуры до 1000°C на всех образцах, кроме облученного высокоэнергетическими ионами, примесная фотопроводимость перестает регистрироваться. На образце, подвергнутом высокоэнергетичной ионной имплантации, при этой температуре фотопроводимость фиксируется лишь начиная с 310 нм и

менее (см. рис. 2). Ни ее характер, ни ее интенсивность не изменяются при увеличении температуры отжига до 1500°C. При этом в спектрах поглощения никаких изменений обнаружено не было.

Данное поведение примесной фотопроводимости в течение изохронного отжига возможно объяснить, учитывая следующее. Во-первых, одной из особенностей метода СВЧ-фотопроводимости является то, что данная методика регистрирует сигнал от областей кристалла с большим временем жизни неравновесных носителей заряда. Во-вторых, при высокоэнергетичной имплантации дефектный слой распространяется на большую глубину кристалла, гораздо глубже, чем при обычной имплантации килоэлектронвольтового диапазона. В-третьих, проведение высокотемпературного отжига уменьшает количество собственных дефектов в кристаллической решетке образца. При 900°C происходит полный отжиг одиночных вакансий. Далее, следует принимать во внимание факт влияния поверхности на СВЧ-фотопроводимость алмаза, который заключается в появлении в запрещенной зоне новых электронных состояний при реконструкции. Учитывая малую толщину образцов (~0.1 мм), следует ожидать общего снижения фоточувствительности по всему спектральному диапазону.

В свете вышесказанного можно объяснить факт исчезновения СВЧ-фотопроводимости в спектральном диапазоне 250 - 700 нм при достижении температуры 1000°C следующим образом. При 900°C происходит отжиг структурных дефектов вакансионного типа во всем объеме кристалла. Это обуславливает снижение интенсивности примесной фотопроводимости, вызванной этими дефектами. Одновременно с этим снижается общая фоточувствительность образцов алмаза, вызванная реконструкцией поверхности. Эти два процесса и приводят к тому, что примесная фотопроводимость перестает регистрироваться. Однако алмаз, облученный высокоэнергетичными ионами, позволяет регистрировать сигнал СВЧ - фотопроводимости в диапазоне от 310 нм и менее. Это объясняется тем, что при высокоэнергетичной имплантации слой радиационных нарушений распространяется на гораздо большую глубину кристалла, и созданные

при высокоэнергетичной ионной имплантации радиационные дефекты, являются более термостабильными.

4. ВЫВОДЫ

Облучение алмаза ионами В⁺ с распределенной энергией в диапазоне 20 - 300 кэВ приводит к тому, что СВЧ - фотопроводимость в спектральном диапазоне 250 - 700 нм после облучения при регистрации с облученной стороны перестает регистрироваться. Отжиг до температуры 1600°C не восстанавливает исходную форму спектрального распределения СВЧ - фотопроводимости. При этом при регистрации после имплантации с необлученной стороны никаких изменений в форме спектрального распределения СВЧ - фотопроводимости обнаружено не было.

Изменения в спектральном распределении СВЧ - фотопроводимости в процессе отжига до температур 900 - 1000°C связываются с отжигом и коагуляцией различных радиационных дефектов, располагающихся, по всей вероятности, глубже слоя торможения ионов. Основанием для данного предположения является то, что эти изменения наиболее ярко выражены в образце, облученном ионами высоких энергий, где слой радиационных нарушений гораздо больше, при этом ширина слоя торможения ионов в образце, подвергнутом высокоэнергетичной имплантации и полиэнергетичной облучению сравнимы. Изменений в спектральном распределении СВЧ-фотопроводимости необлученного образца не происходит.

При измерениях СВЧ - фотопроводимости при температуре 900 - 1000°C наблюдается полное исчезновение СВЧ - фотопроводимости в спектральном диапазоне 250 - 700 нм для образцов, имплантированных ионами В⁺ с распределенной энергией 20 - 300 кэВ, и неимплантированного образца. СВЧ - фотопроводимость в образце,

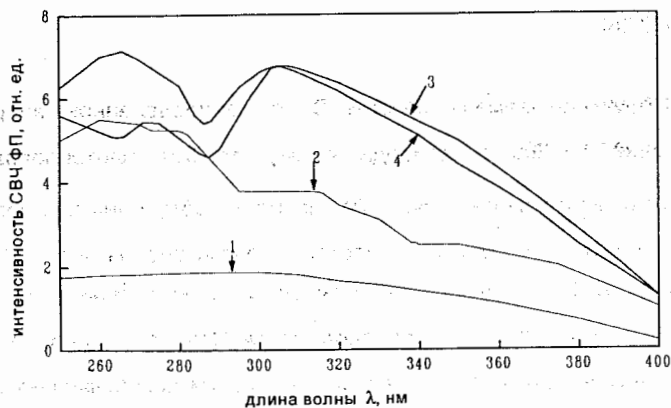


Рис. 1. Спектры СВЧ-фотопроводимости алмаза, имплантированного ионами B^+ с энергией 13.6 МэВ и дозой $1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при различных температурах отжига: Здесь 1 - после имплантации, 2 - $T_{\text{отж}} = 400^\circ\text{C}$, 3 - $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$, 4 - $T_{\text{отж}} = 800^\circ\text{C}$

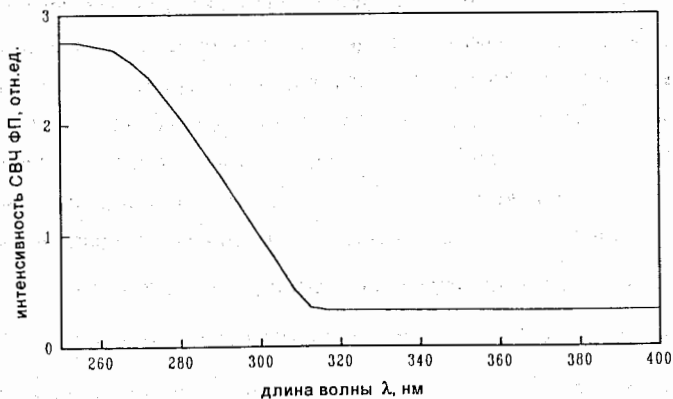


Рис.2 Спектр СВЧ-фотопроводимости алмаза, облученного ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ и дозой $1.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и отожженного при температуре 1100°C

облученном ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ, регистрируется при длинах волн менее 310 нм, при этом интенсивность фотоотклика уменьшается в два раза и остается неизменной до температуры отжига 1500°C . Такое уменьшение фотопроводимости в указанном спектральном диапазоне, видимо, обусловлено снижением общей фоточувствительности образца, которое является следствием реконструкции поверхности алмаза {111}.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Квасков, Н.В. Новиков, Д.В. Федосеев. Алмазная технология - 1992. Тезисы докладов II конференции "Проблемы применения алмаза в электронике", М, 1992, с. 4.
2. А.Г. Гонтарь. Некоторые аспекты использования синтетического алмаза в электронной технике. Тезисы докладов II конференции "Проблемы применения алмаза в электронике", М, 1992, с. 5-6.
3. В. Burchard, А.М. Zaitsev, W.R. Fahrner, А.А. Melnikoy, А.В. Denisenko, V.S. Varichenko. Diamond based light emitting structures. *Diamond and Related Materials*, 3, 1994, p. 947-950.
4. В.С. Вариченко, А.Ю. Дидык, А.М. Зайцев, В.И. Кузнецов, В.М. Кулаков, А.А. Мельников, С.П. Плотникова, В.А. Скуратов, В.Ф. Стельмах, В.Д. Шестаков. Дефектообразование в алмазе при высокоэнергетичной ионной имплантации. *Сверхтвердые материалы*, 1994, № 4, с. 5-12.
5. V.S. Varichenko, А.М. Zaitsev, V.F. Stelmakh. Spatial Distribution of Impurities and Defects Introduced in Diamond by High Energy Ion Implantation. *Phys. Stat. Sol. (a)* 95, 1996, p. K123-K126.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 апреля 1997 года.