

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В АЛМАЗЕ, ОБЛУЧЕННОМ ИОНАМИ БОРА

Peculiarities of defect production in Ia diamond subjected to high energy boron implantation and keV boron polyenergetic implantation are studied and discussed.

Введение

Ионная имплантация в алмаз, помимо формирования ионно-легированного слоя, приводит к возникновению слоя, содержащего радиационные дефекты. Образование радиационных дефектов в кристаллах, облученных ионами высоких энергий (>1 МэВ/а.е.м.), значительно отличается от дефектообразования при ионной имплантации килоэлектронвольтового диапазона [1–5]. Отличительной особенностью высокоэнергетичной имплантации является слоистость дефектной структуры, возникающая вследствие того, что на разных глубинах доминируют различные механизмы взаимодействия ионов с решеткой. Помимо этого для высокоэнергетичной имплантации характерно наличие радиационных дефектов в облученных кристаллах на глубинах, значительно превышающих среднеквадратичный пробег имплантированных ионов. И, наконец, такая имплантация создает области сильных упругих напряжений, в том числе и на глубине, превышающей положение слоя внедренной примеси. Так, например, даже при имплантации ионов Li, C, P при энергиях до 200 кэВ глубина слоя напряжений может достигать уже 200 мкм [6]. Характерным является также и то, что радиационные дефекты, образующиеся при высокоэнергетичной имплантации, оказываются более термостабильными, чем дефекты, образованные при обычной имплантации.

В настоящей работе рассматриваются особенности дефектообразования в кристаллах природного алмаза типа Ia, облученных высокоэнергетичными ионами бора и подвергнутых полиэнергетичной имплантации ионами бора килоэлектронвольтового диапазона.

Материал и методика

В работе использовались пластины природного алмаза типа Ia, вырезанные по плоскости {111} и облученные ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ и дозой $1,25 \cdot 10^{15}$ см⁻², ионами B^+ с распределенной энергией 20–300 кэВ и суммарной дозой $3 \cdot 10^{14}$ см⁻². Нагрев образцов в процессе облучения не превышал 100°C. Высокотемпературный отжиг образцов проводился в графитовом контейнере в вакууме 10^{-4} Па. Запись спектров фотопроводимости выполнялась на установке с использованием СВЧ-резонатора с перестраиваемой собственной частотой и регулируемым отверстием связи, частота СВЧ-поля составляла 10 ГГц. Неравновесные носители заряда возбуждались модулированным с частотой 300 Гц светом от ксеноновой лампы, прошедшим через монохроматор МДР-12, в спектральном диапазоне 200–700 нм. Регистрация фотоотклика осуществлялась в режиме синхронного детектирования. Исследование оптического поглощения проводилось на спектрофотометре SPECORD M-40 в спектральной области 200–850 нм. Измерения СВЧ-фотопроводимости и оптического поглощения выполнялись при температуре 300 К.

Результаты и их обсуждение

При рассмотрении полученных результатов выделим две спектральные области: собственную, в диапазоне длин волн 200–250 нм, и примесную — 250–700 нм.

Ионное облучение приводит к изменениям интенсивности сигнала и спектрального распределения СВЧ-фотопроводимости при измерениях как с облученной стороны алмазных пластин, так и с необлученной. Поэтому рассмотрим влияние формируемых при облучении радиационных дефектов на спектры СВЧ-фотопроводимости с обеих сторон облученных пластин.

Сравнение спектров СВЧ-фотопроводимости для образцов, подвергнутых полиэнергетичной имплантации ионами B^+ с энергией 20–300 кэВ, регистрируемых с *облученных* сторон алмазных пластин до и после облучения, показало, что интенсивность сигнала в области 200–250 нм упала более чем на порядок. Положение максимума собственной СВЧ-фотопроводимости при этом сдвинулось с 215–219 нм в длинноволновую область 225–235 нм (рис. 1). В спектральном диапазоне 250–700 нм при измерениях с *облученной* стороны образцов после имплантации фотоотклик перестает регистрироваться.

Регистрация спектров собственной СВЧ-фотопроводимости с *необлученной* стороны показала, что в образцах, подвергнутых полиэнергетичной имплантации, интенсивность собственной фотопроводимости возросла (см. рис. 1). Это может быть обусловлено пассивацией центров рекомбинации в объеме кристалла такими радиационными дефектами, как собственные междоузельные атомы, которые подвижны уже при температуре 320 К [7]. Другие радиационные дефекты (например, вакансии, атомы бора) являются неподвижными при температурах измерения и имплантации [7–9] и поэтому могут быть исключены из рассмотрения.

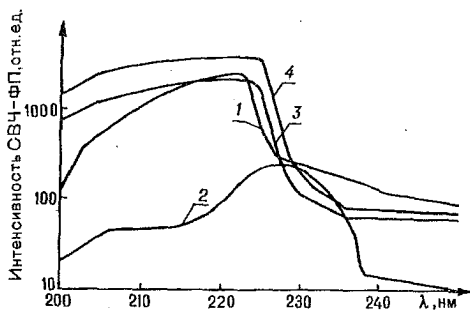


Рис. 1. Спектры СВЧ-фотопроводимости образца алмаза до облучения - 1, 3 и после облучения ионами B^+ с распределенной энергией 20–300 кэВ и дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

2 - при регистрации с облученной стороны,
4 - при регистрации с необлученной стороны

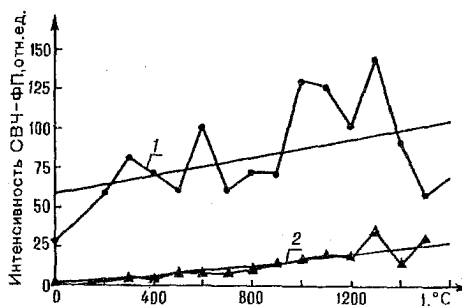


Рис. 2. Зависимость интенсивности СВЧ-фотопроводимости облученных образцов: 1 - (20–300 кэВ, $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), 2 - (13,6 МэВ, $1,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) от температуры отжига при регистрации с облученной стороны

При измерениях СВЧ-фотопроводимости с *необлученной* стороны в области 250–700 нм до и после имплантации с распределенной энергией было установлено, что облучение не повлияло на форму спектра и интенсивность СВЧ-фотопроводимости.

В спектрах поглощения облучение приводит к возрастанию поглощения во всем диапазоне исследования и появлению широкой полосы, обусловленной центром GR (530–730 нм), и центра 3Н.

Изучение СВЧ-фотопроводимости алмазов, облученных ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ и распределенной энергией 20–300 кэВ, с *облученной* стороны в процессе изохронного отжига до температуры 1600°C показало, что с ростом температуры интенсивность фотопроводимости в спектральном диапазоне 200–250 нм плавно возрастала (рис. 2), а ее максимум на различных образцах либо смещался в длинноволновую область, либо оставался примерно на одном месте. Это обусловлено отжигом радиационных дефектов, приводящим к увеличению времени жизни носителей заряда, и деградацией поверхности за счет графитизации облученной поверхности алмаза. Графитизация приводит к тому, что даже при температуре отжига 1600°C начало фотопереходов зона-зона на длине волны 225 нм зарегистрировать не удастся. Отжит также не приводит к восстановлению интенсивности сигнала в области примесной фотопроводимости (250–700 нм).

Изучение собственной СВЧ-фотопроводимости с *необлученной* стороны кристаллов, облученных ионами B^+ с энергией 13,6 МэВ и распределенной энергией 20–300 кэВ, показало, что с ростом температуры отжига наблюдается увеличение интенсивности фотопроводимости, т.е. преобладают тенденции, увеличивающие время жизни носителей заряда в приповерхност-

ном слое образца. Однако если в образце, облученном ионами высоких энергий, рост интенсивности наблюдается вплоть до температуры отжига 900°C , то в образцах, облученных с энергией $20\text{--}300\text{ кэВ}$, — только до 700°C , а в неимплантированном образце — до 400°C .

При температуре отжига $900\text{--}950^{\circ}\text{C}$ происходит резкое уменьшение интенсивности собственной СВЧ-фотопроводимости во всех исследованных образцах. Одновременно с этим при температуре отжига $950\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ происходит качественное изменение распределения СВЧ-фотопроводимости в спектральном диапазоне $200\text{--}250\text{ нм}$, что проявляется в сдвиге максимума фотопроводимости в длинноволновую область. При этом спектры оптического поглощения необлученного образца при температурах отжига $200\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ практически не изменялись, а в спектрах поглощения облученных образцов регистрировалось уменьшение коэффициента поглощения, что обусловлено процессами, связанными с отжигом радиационных дефектов. Резкое уменьшение интенсивности собственной СВЧ-фотопроводимости наиболее вероятно обусловлено реконструкцией (все исследуемые алмазные пластины имели две плоскости $\{111\}$, имеющие отрицательное электронное сродство) поверхности. Представляется вполне вероятным, что действие возбуждающего света с энергией кванта $>5,47\text{ эВ}$ приводит к увеличению числа свободных носителей заряда не только в приповерхностном слое образца, но и над поверхностью [10,11,12]. Процесс реконструкции приводит к тому, что электронное сродство алмазной поверхности становится положительным и появляются дополнительные электронные состояния [13,14,15]. Это, в свою очередь, обуславливает уменьшение времени жизни носителей заряда в приповерхностном слое.

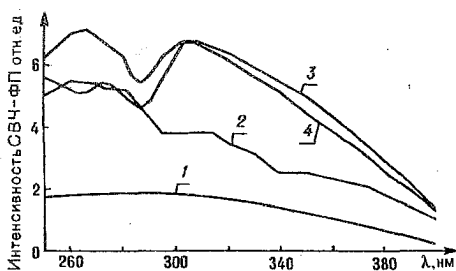


Рис.3. Спектры СВЧ-фотопроводимости образца алмаза, облученного ионами B^+ : 1 — с энергией $13,6\text{ МэВ}$ и дозой $1,25 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ при различных температурах отжига: 2 — 400°C , 3 — 500°C , 4 — 800°C при регистрации с необлученной стороны

Изменение спектрального распределения СВЧ-фотопроводимости в процессе отжига до температуры $\sim 900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ в примесной области при регистрации с необлученной стороны обусловлено отжигом и коагуляцией различных радиационных дефектов (рис.3). Наиболее вероятно, что это дефекты междоузельного типа и собственные дефекты, которые располагаются глубже слоя остановки имплантированных атомов бора. Основанием для такого предположения служит тот факт, что примесная фотопроводимость и ее изменения с отжигом наиболее ярко выражены в образце, подвергнутом высокоэнергетичной имплантации. Поскольку высокоэнергетичное облучение приводит к образованию радиационных дефектов и широкой области сильных упругих напряжений, которые располагаются значительно глубже слоя внедренных ионов примеси, то в имплантированном ионами высоких энергий образце слой внутренних напряжений оказывается намного шире, чем при обычной имплантации. В то же время ширина легированного ионами бора слоя при использовании высокоэнергетичной и ширина этого слоя при использовании полиэнергетичной имплантации оказываются сравнимыми.

При увеличении температуры отжига до 1000°C на всех образцах, кроме облученного высокоэнергетичными ионами, примесная фотопроводимость перестает регистрироваться. На образце, подвергнутом высокоэнергетичной ионной имплантации, при этой температуре фотопроводимость фиксируется лишь начиная с 310 нм и менее. Ни вид спектра, ни интенсивность фотоотклика не изменяются при увеличении температуры отжига до 1500°C . Исчезновение примесной фотопроводимости в образцах, имплантированных ионами бора с распределенной энергией при 1000°C , обусловлено отжигом дефектов и одновременным снижением общей фоточувствительности образцов, обусловленной реконструкцией поверхности. Возмож-

ность регистрации в примесной области фотоотклика образца, облученного ионами высоких энергий, определяется тем, что при высокоэнергетичной имплантации дефекты оказываются более термостойкими и ширина нарушенного слоя больше, чем при имплантации ионами бора килоэлектронвольтового диапазона.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что облучение алмаза приводит к тому, что интенсивность СВЧ-фотоотклика при измерениях с *облученной* стороны в спектральном диапазоне 200–250 нм уменьшается более, чем на порядок, в то время как при регистрации с *необлученной* стороны интенсивность СВЧ-фотопроводимости после облучения может увеличиваться. Изохронный отжиг до температуры 900°C приводит к возрастанию интенсивности собственной СВЧ-фотопроводимости с обеих сторон алмазной пластины, что обусловлено отжигом радиационных и структурных дефектов. При этом наиболее значительные изменения в спектрах СВЧ-фотопроводимости в течение отжига происходят в образце, облученном ионами высоких энергий, что обусловлено существенным вкладом в фотопроводимость дефектного слоя, который располагается глубже слоя торможения ионов. Резкое уменьшение интенсивности фотоотклика при температуре отжига 950–1000°C при регистрации с *необлученной* стороны определяется, наиболее вероятно, процессами реконструкции поверхности алмаза {111} и отжигом радиационных и структурных дефектов.

Данная работа частично была профинансирована в рамках проекта INTAS-94-1982.

1. Zaitsev A.M., Fedotov S.A., Melnikov A.A. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1993. B82. P.421.
2. Varichenko V.S., Zaitsev A.M., Melnikov A.A. et al. // Ibid. 1994. B94. P.259.
3. Varichenko V.S., Zaitsev A.M., Kazutchits N.M. et al. // Ibid. 1996. B107. P.268.
4. Вариченко В.С., Дидык А.Ю., Зайцев А.М. и др. // Дефектообразование в алмазе при высокоэнергетичной ионной имплантации. Дубна, 1988.
5. Зайцев А.М. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1991. №10. С.56.
6. Вавилов В.С. // Алмаз в электронной технике. М., 1990. С.14.
7. Derry T.E., Prins J.F., Madiba C.C.P. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1988. B35. P.431.
8. Вавилов В.С., Гиппиус А.А., Копорова Е.А. // Электронные и оптические процессы в алмазе. М., 1985.
9. Копорова Е.А., Сергиенко В.Ф., Ткаченко С.Д. и др. // Сверхтвердые материалы. 1984. №6. С.3.
10. Himpfel F.J., Knapp J.A., Van Vechten, Eastman D.E. // Phys. Rev. B. 1979. V.20. №2. P.624.
11. Квасков В.Б. // Алмаз в электронной технике. М., 1990. С.92.
12. Моряков О.С., Квасков В.Б., Горбачев В.В. и др. // Обзоры по электронной технике. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1988. Вып.4(1342).
13. Pate V.B. // Surface Science. 1986. V.165. P.83.
14. Lurie P.G., Wilson J.M. // Ibid. 1977. V.65. P.453.
15. Pate V.B., Waclawski B.J., Stefan P.M. et al. // Phys. 1983. 117B & 118B. P.783.

Поступила в редакцию 02.03.97.

УДК 537.635:546.273

А.Р. ФИЛИПП

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ В АЛМАЗ

Some peculiarities of defect production in diamond irradiated with high energy ions have been investigated. Defect structure in subsurface layer and in the layer located deeper than projected ion range are considered on a basis of ion track production and defect diffusion, respectively.

Введение

Образование радиационных дефектов в кристаллах, облученных ионами с энергиями более 1МэВ/а.е.м., существенно отличается от дефектообразования при ионной имплантации с энергией десятки и сотни кэВ. Это про-