

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА КОЛОНИИ МЕДИ В КРЕМНИИ

И. Н. Смирнов, М. В. Бахтирова, И. П. Матханова

Важной задачей полупроводникового материаловедения является изучение основных закономерностей взаимодействия нарушений, возникающих при бомбардировке монокристаллов атомными частицами, с имеющимися в материале несовершенствами кристаллической структуры. Относящиеся к числу таких несовершенств колонии выделений быстродиффундирующих примесей металлов (в частности, меди) служат стоками точечных дефектов и оказывают влияние на их электронную структуру [1-3]. Поэтому облучение монокристаллов кремния, содержащих колонии выделений меди, создает условия для более полного выяснения природы радиационных повреждений.

Образцы для исследования представляли собой плоские полированные пластины толщиной 0.22 и диаметром 44 мм, вырезанные из бездислокационного монокристалла кремния *n*-типа параллельно плоскости (111). Введение меди осуществлено из специально насыщенных медью пластин-источников в течение 10 мин при температуре 1323 К с последующим быстрым охлаждением, близким к заморозке. Выделения меди в виде колоний, имеющих форму трехмерных звезд или дендритов, образуются при охлаждении монокристаллов кремния от температуры не ниже 973 К со скоростью > 1 К/с.

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям [4, 5], частицы, из которых состоят колонии, представляют собой выделения сферической или эллипсоидальной формы, ограниченные дислокациями с векторами Бюргерса $\langle 110 \rangle$ и $a \langle 100 \rangle$, где a — период кристаллической решетки кремния.

После введения меди с образованием колоний выделений образцы подвергли бомбардировке электронами (с энергией $E=400$ кэВ, дозой $\Phi=5 \cdot 10^{20}$ м⁻²), протонами ($E=100$ кэВ, $\Phi=2 \cdot 10^{19}$ м⁻²) и ионами бора ($E=100$ кэВ, $\Phi=5 \cdot 10^{18}$ м⁻²).

Выявление изменений в колониях меди под действием облучения проведено методами избирательного травления (травитель содержал 3 части хромового триоксида и 2 части плавиковой кислоты) и просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе Tesla B-513 при ускоряющем напряжении 80 кВ.

Необлученные колонии видны в оптическом микроскопе после избирательного травления как бугры дендритной формы различных размеров и плотности (рис. 1, а). Микрофотографии тех же образцов в электронном микроскопе показывают, что бугры представляют собой скопления мелких (< 500 Å) выделений, ограниченных дислокациями.

При исследованиях в электронном микроскопе в ряде случаев вокруг колоний выявляются области, имеющие более светлый контраст по сравнению с окружающим материалом — в дальнейшем условно будем называть эти области «просветлениями». Опыты с дополнительным оттенением показали, что это просветления меньшей толщины, появляющиеся в процессе приготовления (с последующим полирующим травлением) тонких кристаллов, прозрачных для электронов с энергией 80 кэВ. Поскольку при уменьшении толщины образца в электронном микроскопе наблюдалось увеличение размеров «просветлений» (т. е. их

дальнейшее растравливание), это явление можно интерпретировать как результат воздействия полирующего травителя на скопления вакансий участка, обогащенные вакансиями.

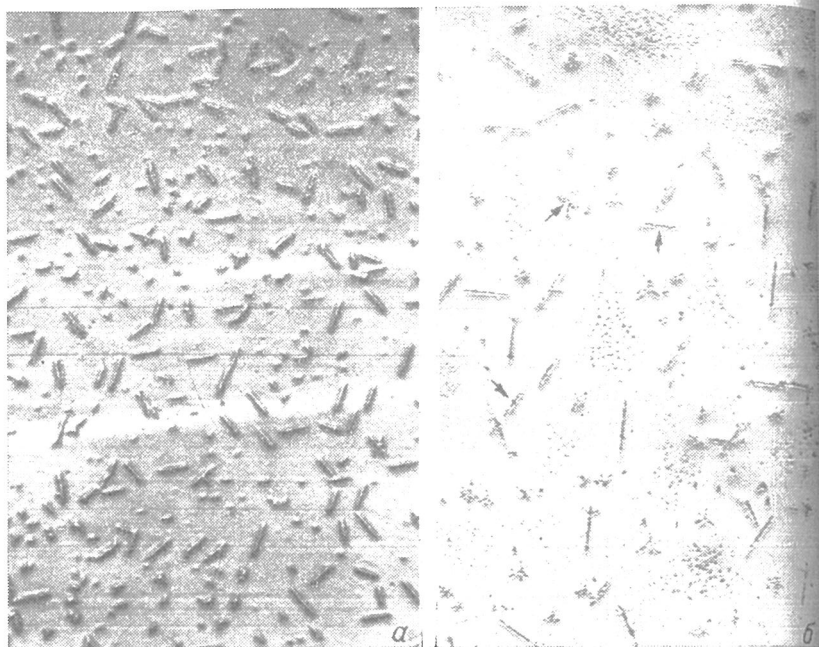


Рис. 1. Микрофотографии колоний выделений меди в кремнии после избирательного травления.

Оптический микроскоп; $\times 450$, а — в исходном состоянии; б — после бомбардировки протонами. В стрелкой указаны наборы ямок внутри дендритных бугров.

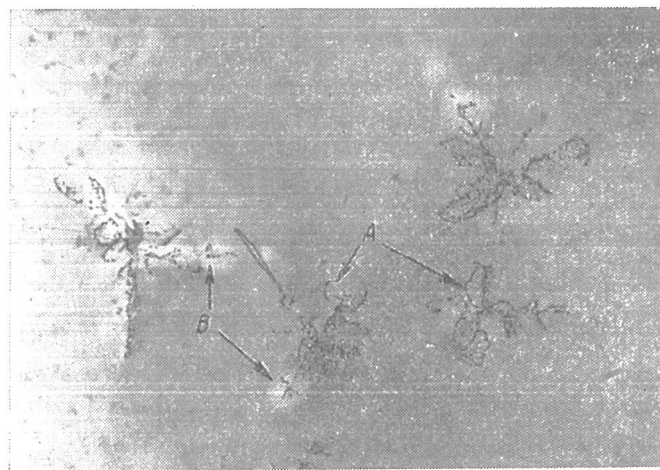


Рис. 2. Микрофотография образца с колониями выделений меди после бомбардировки протонами.

Электронный микроскоп; $\times 4300$. А — дислокации, окружающие выделения, В — «просветления».

Наблюдения в электронном микроскопе после облучения не выявили существенных изменений в структуре и морфологии колоний, но обнаружили наличие эффекта «просветлений», что выразилось в увеличении их числа и размера (рис. 2).

Метод избирательного травления после облучения выявил следующие особенности.

1. Скорость травления облученного кремния уменьшается примерно на порядок (с 1.27 до 0.11 мкм/мин для двухминутного травления).

2. Внутри дендритных бугров в оптическом микроскопе наблюдаются ямки треугольной формы, отражающие процесс распада (растрава) колоний при травлении.

Толщина удаленного слоя кремния в облученных образцах не превышала 0.22 мкм, т. е. была существенно меньше глубины проникновения бомбардирующих частиц.

После облучения электронами число ямок внутри бугров мало и не вносит заметных изменений в общую картину. Гораздо сильнее этот эффект выражен после бомбардировки протонами (рис. 1, б). После внедрения ионов бора бугры практически уже не видны, а заметны лишь области, на которых ранее располагались бугры и которые представляют собой теперь скопления ямок.

Таким образом, процесс распада, «развала» колоний при избирательном травлении, несмотря на снижение общего числа (дозы) частиц от более легких к более тяжелым, происходит тем интенсивнее, чем больше масса бомбардирующих частиц. Поскольку с увеличением массы частиц величина их проецированного пробега в кристалле уменьшается, а плотность создаваемых нарушений периодичности решетки растет, приведенные данные свидетельствуют о том, что за наблюдаемый эффект ответственны дефекты кристаллической структуры, а не такие явления, как ионизация вещества.

Бомбардировка монокристаллов атомными частицами создает соизмеримое с числом образующихся вакансий количество нарушений междоузельного типа [6, 7]. Известно [8], что в решетках металлов и, в частности, меди такие дефекты, имеющие гантельную конфигурацию, образуются значительно легче, чем в кремнии, и являются типичным и устойчивым видом нарушений. Если считать, что кристаллическая структура выделений меди в кремнии существенно ближе к структуре меди, чем окружающая матрица [4, 5], то выделения меди следует рассматривать как стоки для радиационных дефектов междоузельного типа.

Приведенные данные позволяют предположить, что в области колоний меди в кремнии при облучении происходит эффективное пространственное разделение радиационных дефектов. Накапливание вакансий вокруг колоний и сток междоузельных атомов внутрь медных выделений, с одной стороны, и статистически равномерное распределение дефектов вакансионного и междоузельного типа в матричной решетке, с другой стороны, обуславливают различия в избирательном травлении колоний меди и окружающей кремниевой матрицы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках (под ред. Л. С. Смирнова), 114. Новосибирск (1977).
- [2] Р. Ф. Коноплева, С. Р. Новиков. ФТП, 2, 1290 (1968).
- [3] М. В. Бахтиярова, З. В. Караченцева, Б. Н. Седунов, Ю. В. Федорович. Тез. докл. X Всес. конф. по электронной микроскопии, 112. М. (1976).
- [4] G. Das. J. Appl. Phys., 44, 4459 (1973).
- [5] E. Nes. Phys. St. Sol. (A), 33, k5 (1976).
- [6] И. Н. Смирнов. ДАН СССР, 225, 621 (1975); ФТП, 10, 1596 (1976).
- [7] И. Н. Смирнов, В. В. Копышев, Т. Г. Алксис. ФТТ, 19, 1393 (1977).
- [8] В. М. Агранович, В. В. Кирсанов. УФН, 1, 3 (1976).

Поступило в Редакцию
23 ноября 1981 г.
Принято к печати
1 июля 1982 г.