

Последние экспериментальные исследования [8] показали, туннельная проводимость в аморфном Ge на самом деле не воспроизводит плотность состояний в запрещенной зоне неупорядоченного полупроводника.

Автор благодарит проф. В. Л. Бонч-Бруевича за постоянную помощь и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belova J. M. «Phys. Stat. Sol.», 1976, 73, 709.
2. Белова И. М. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. III, физ., астроном.», 1975, 16, № 5 (деп.).
3. Белова И. М. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. III, физ., астроном.», 1975, 16, № 5 (деп.).
4. Osmun T. W., Fritzsche H. «Appl. Phys. Lett.», 1970, 16, 87.
5. Sauvage T. A., Mogab G., Adler D. «Phys. Mag.», 1972, 25, 1305.
6. Osmun T. W. «Solid st. Comm.», 1973, 13, 305.
7. Yamashita K., Fujiyasu H., Kobayashi T. «J. Appl. Phys.», 1974, 13, 290.
8. Osmun T. W. «Phys. Rev.», 1975, B11, 5008.

Поступила в редакцию
27.1 1976 г.

Кафедра
физики полупроводников

УДК 548:539.12.04

В. Л. ЗЕФИРОВА, Е. В. КОЛОНЦОВА, В. П. ЛУЦЕНКО

ДЕФЕКТЫ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛЛАХ LiF и NaCl ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ

В данной работе показана возможность использования методов избирательного травления и электронно-микроскопического анализа (по репликам) для определения характера дефектов в облученных электронами (дозы $5 \times 10^{15} - 2,2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$) монокристаллах LiF и NaCl, а также выясняются причины различного изменения дифракционной картины в этих кристаллах после облучения [1] и уточняются особенности в дефектной структуре LiF, связанные с разрушением кристаллов LiF при некоторых условиях облучения ($E_e \sim 1 \text{ МэВ}$, доза $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$).

Монокристаллические образцы для облучения размером $\sim 6 \times 6 \times 2 \text{ мм}^3$ выкалывались из одного монокристалльного блока. Облучение электронами проводилось при температуре $\leq 40^\circ\text{C}$ в линейном ускорителе электронов при потоках электронов $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($E_e = 7-9 \text{ МэВ}$) и $4-12,5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($E_e = 1 \text{ МэВ}$).

Травление монокристаллов LiF производилось в слабом водном растворе хлорного железа, полировка — в 50-процентном водном растворе плавиковой кислоты. Травление NaCl — в смеси: 1 часть метилового спирта и 2 части вымороженной уксусной кислоты.

Рельеф поверхности облученных кристаллов после избирательного травления существенно зависит от энергии электронов. При $E_e = 7-9 \text{ МэВ}$ результат облучения LiF и NaCl подобен воздействию других видов облучения (нейтронов, гамма и рентгеновских квантов). Травленная поверхность кристаллов становится равномерно шероховатой (рис. 1), что вызывается [2-4] образованием скоплений точечных дефектов после облучения. По сравнению с необлученными кристаллами заметно уменьшаются размеры дислокационных ямок травления и искажается их форма (особенно для NaCl), что может быть связано с декорированием дислокаций радиационными дефектами или с изменением процесса вытравливания дислокаций вследствие значительного увеличения концентрации точечных дефектов при облучении. С увеличением дозы облучения эти эффекты становятся более ярко выраженными. По репликам удалось оценить верхнюю границу размеров образующихся в монокристаллах LiF скоплений: $\sim 100-200 \text{ \AA}$ после облучения $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Причем после дополнительного отжига при $T = 600-700^\circ\text{C}$, как и после облучения нейтронами [5], появляются правильно ограниченные поры размерами $\sim 1000 \text{ \AA}$, откуда следует, что хотя бы часть скоплений образована вакансиями¹.

¹ В монокристаллах NaCl даже после отжига $T = 700^\circ\text{C}$ скопления с размерами $\sim 200 \text{ \AA}$ и более не выявляются.

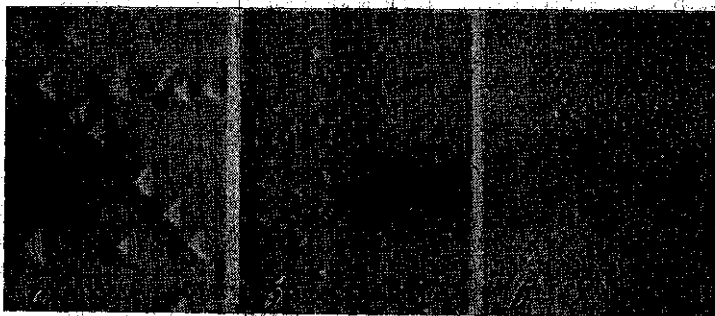


Рис. 1. Травленные поверхности свежего скола монокристалла NaCl, облученного электронами ($E_e=1$ МэВ): а — необлученный NaCl, время травления 15 с, $\times 300$; б — 10^{16} см $^{-2}$, время 15 с, $\times 300$; в — 5×10^{17} см $^{-2}$, время 1 мин, $\times 300$

При облучении электронами с $E_e=1$ МэВ поведение LiF принципиально отличается от вышеописанного: после травления отсутствует шероховатость поверхности, размеры и форма ямок травления не искажаются по сравнению с необлученным LiF, вытравливаются дислокационные «розетки», напоминающие розетки уюлда (рис. 2). Концентрация таких «розеток» увеличивается с дозой облучения, но существенно зависит от потока электронов (приводимые ниже дозы облучения с $E_e=1$ МэВ получены при потоке $\sim 9 \times 10^{12}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$). Распределены они неравномерно: в областях, прилегающих к свободной поверхности кристалла, при всех дозах облучения концентрация их равна нулю, ширина таких «приповерхностных» областей $\sim 0,7$ мм при дозе 5×10^{15} см $^{-2}$ и 0,2 мм при дозе 2×10^{17} см $^{-2}$. Окраска облученного кристалла также различна. В «приповерхностных» областях она более светлая по сравнению с центральной частью образца, где наблюдаются «розетки».

Наблюдаются две разновидности таких розеток. У одних ряды-лучи идут по двум направлениям $\langle 110 \rangle$, а у других добавляется еще третий ряд по одному из направлений $\langle 100 \rangle$ (см. рис. 2). Последнее травление с промежуточной подирировкой поверхности показало, что «розетки» первого типа образованы дислокационными полупетлями в основном краевой ориентации. Они наблюдаются вблизи протяженных ($\sim 30-40$ мкм) дефектов, ориентированных по направлениям типа $\langle 100 \rangle$. «Розетки» второго типа связаны с появлением более протяженных (до 1 мм) нарушений, направленных также по $\langle 100 \rangle$, причем лучи по $\langle 110 \rangle$ образованы тоже дислокационными полупетлями в основном краевой ориентации, а дислокационные линии, образующие третий ряд, располагаются в плоскости типа (100).

Возникновение «розеток» обусловлено долями напряжений вокруг этих протяженных по $\langle 100 \rangle$ нарушений, появляющихся в LiF при $E_e=1$ МэВ. Максимальная составляющая проекции силы соответствует векторам Бюргерса, расположенным в плоскости сдвига $\{110\}$, перпендикулярно направлению нарушения. Следовательно, лучи по $\langle 110 \rangle$ вызваны пластической деформацией сдвигом в нормальных плоскостях сдвига. С учетом механизма сдвига и данных последыного травления объяснить появление луча по $[100]$ деформацией сдвига не представляется возможным. Более вероятно, что напряжения вокруг более протяженных нарушений достаточны для образования и развития микротрещин, приводящих в конечном итоге к наблюдаемому при дозах $\geq 5 \times 10^{17}$ см $^{-2}$ растрескиванию и разрушению образца по $\{100\}$. На наличие напряжений указывают и небольшие ряды по направлениям $\langle 110 \rangle$ из нормальных дислокационных ямок (стрелки на рис. 2), появляющиеся при дозах 5×10^{15} см $^{-2}$ и распространяющиеся почти на весь кристалл при последующем облучении. Они являются, как показывает последыное травление, обычными полосами сдвига, образованными дислокационными полупетлями длиной около 10 мкм. Отсутствие шероховатости поверхности монокристаллов LiF при облучении с $E_e=1$ МэВ, по-видимому, связано с тем, что описанные линейные дефекты являются хорошими стоками для точечных дефектов.

Деформационная картина, наблюдаемая в исследованных образцах LiF, принципиально отличается от наблюдавшейся ранее деформации кристалла вокруг каналов пробоя в [6, 7].

Из полученных результатов заслуживает внимания тот факт, что изменение процесса вытравливания дислокаций при облучении идет более активно в кристаллах NaCl и, кроме того, наблюдается существенное различие в рельефах облученных монокристаллов NaCl и LiF (по данным электронно-микроскопического анализа).

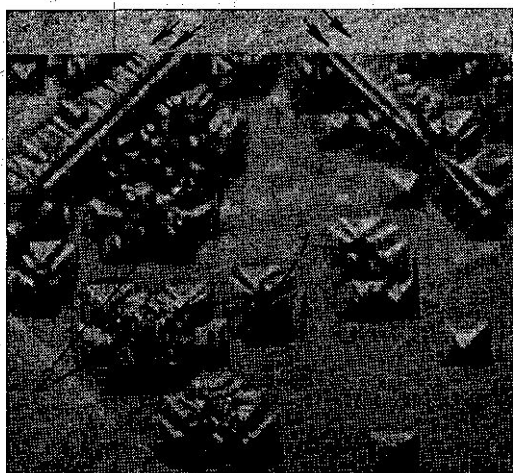


Рис. 2. Травленная поверхность облученного электронами монокристалла LiF ($E_e=1$ МэВ, доза 5×10^{17} см $^{-2}$) $\times 500$. Цифрами 1 и 2 обозначены розетки первого и второго типов

Коэффициенты самодиффузии ионов в кристаллах LiF существенно меньше по сравнению с NaCl и KCl [8—11]. Таким образом, полученные и литературные данные позволяют объяснить особое поведение монокристаллов LiF при всех видах облучения (нейтронами, гамма и рентгеновскими квантами) тем, что в NaCl и KCl радиационный отжиг при $T_{обл} \geq 40^\circ\text{C}$ успешно конкурирует с процессами генерирования радиационных дефектов и основным фактором, определяющим итоговую дефектную структуру этих кристаллов, является диффузионная подвижность дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зефирова В. Л., Колонцова Е. В., Жданов Г. С., Луценко В. П. «Кристаллография», 19, 1108, 1974.
2. Колонцова Е. В., Линник В. М. «Кристаллография», 14, 1044, 1969.
3. Колонцова Е. В., Кулявик А. «Кристаллография», 7, 354, 1962.
4. Gilman J. J., Jonston W. G. «J. of Appl. Phys.», 29, 877, 1958.
5. Зефирова В. Л., Колонцова Е. В., Телегина И. В. ДАН СССР, 199, 821, 1971.
6. Gilman J. J., Stauff D. W. «J. of Appl. Phys.», 29, 120, 1958.
7. Шаскольская М. П., Вань-Ян-Вень, Гу-Щу-Чжаю. «Физика твердого тела», 2, 658, 1961.
8. Наумов А. Н., Пташник В. Б. «Физика твердого тела», 10, 452, 1968.
9. Nelson V. C., Friauf R. J. «J. Phys. Chem. Sol.», 31, 825, 1970.
10. Beniere F., Beniere M., Chemla M. «J. Phys. Chem., Sol.», 31, 1205, 1970.
11. Beniere M., Beniere F., Chemla M. «J. Chim. Phys. Physicochim. Biol.», 67, 1312, 1970.

Поступила в редакцию
11.12 1974 г.

Кафедра
физики твердого тела