

Н. М. ОМЕЛЬЯНОВСКАЯ, С. Я. ЛЕБЕДЕВ, О. И. КАПУСТА

**ЭФФЕКТ РЕЛАКСАЦИИ ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИОНОВ АРГОНА С ПОВЕРХНОСТЬЮ
Ge и InAs**

(Представлено академиком В. Л. Гинзбургом 7 X 1970)

При изучении ионно-электронной эмиссии (и.-э.э.) некоторых полупроводниковых монокристаллов с отожженными дефектами нами было обнаружено различие в значениях коэффициентов и.-э.э. γ_0 , измеряемых сразу же после совмещения направления падения пучка ионов с тем или иным кристаллографическим направлением монокристалла, и его равновесным

значением $\gamma_{эр}$, которое устанавливалось спустя некоторое время. Ясно, что наличие этого эффекта обусловлено какими-то релаксационными процессами, происходящими в приповерхностном слое мишени и влияющими на ее прозрачность по отношению к падающему пучку ионов. Подробное исследование этого эффекта представляет интерес, поскольку оно может дать информацию о подвижности радиационных дефектов, возникающих в поверхностном слое.

Измерения были проведены на кристаллах Ge и InAs. Приготовленные срезы по плоскостям (111) предварительно сошлифовывались, стравливались и тщательно промывались. Ориентация их, после закрепления в специальный держатель для мишени, проверялась на рентгеновской установке УРС-55И. Отклонение поверхности от желаемой плоскости не превышало 1° . Для измерений использовался ионный пучок установки ИЛУ-100 (1). Измерения коэффициентов γ_0 проводились в специальном экспериментальном устройстве, описанном в (2). Вакуум вблизи мишени, благодаря дополнительному охлаждению коллектора электронов, в рабочих условиях составлял $(5-6) \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Используемые плотности тока ионов $j \approx (0,6-1)$ ма/см². Температура образцов измерялась хромель-алюмелевой термопарой, спай которой закреплялся в глухом отверстии, просверленном в мишени с помощью электроэрозийного сверлильного станка.

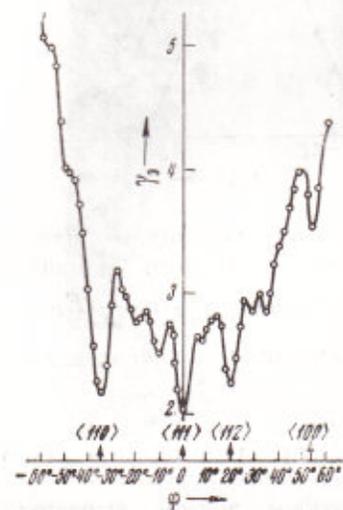


Рис. 1. Зависимость $\gamma_0(\varphi)$ при бомбардировке грани (111) германия ионами аргона с энергией 70 кэВ (ось вращения $\langle 110 \rangle$) при температуре 424°C

Эксперимент проводился следующим образом. Устанавливался некоторый угол φ_1 , под которым происходила бомбардировка образца в течение времени, достаточного для установления равновесного состояния. После этого производилось быстрое изменение угла падения пучка до совмещения направления падения пучка с необходимым кристаллографическим направлением (φ_2). В момент этого совпадения происходило включение секундомера и снималась зависимость γ_0 от времени бомбардировки в этом направлении. Все описанные переходы от φ_1 к φ_2 как для кристалла InAs, так и для Ge происходили в плоскости (110).

С целью облегчить понимание приводимых временных зависимостей $\gamma_{\text{в}}$ на рис. 1 представлена кривая угловой зависимости коэффициента и.-э.э. для Ge при повороте вокруг оси $\langle 110 \rangle$. Качественно такая же зависимость имеет место и для монокристалла InAs (3).

На рис. 2 показаны изменения $\gamma_{\text{в}}$ со времени t для трех различных направлений падения ионного пучка на кристалл InAs, соответствующих прозрачным направлениям $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ и максимуму на кривой $\gamma_{\text{в}} = f(\varphi)$ при $\varphi_2 = -26^\circ$. Как видно из рис. 2, 1, 2, начальные значения $\gamma_{\text{в}}$, измеренные в направлениях $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$, значительно меньше величины $\gamma_{\text{в}}$. При

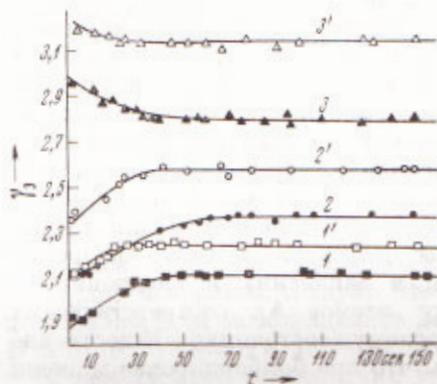


Рис. 2. Зависимости $\gamma_{\text{в}}(t)$ при бомбардировке грани $\langle 111 \rangle$ монокристалла InAs ионами аргона с энергией 70 кэВ. Переходы осуществлялись в плоскости $\{110\}$ от $\varphi_1 = -58^\circ$ к $\varphi_2 = 0$ (1, 1'), $\varphi_2 = -34^\circ$ (2, 2') и $\varphi_2 = -27^\circ$ (3, 3'). 1, 2, 3 — для $T = 170^\circ$; 1', 2', 3' — $T = 420^\circ$

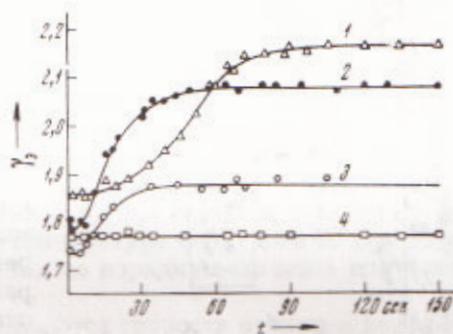


Рис. 3. Зависимости $\gamma_{\text{в}}(t)$ при бомбардировке грани $\langle 111 \rangle$ германия ионами аргона с энергией 70 кэВ в направлении $\langle 111 \rangle$ (угол первоначальной бомбардировки $\varphi_1 = 58^\circ$ в плоскости $\{110\}$) при различных температурах: 1 — 329° , 2 — 456° , 3 — 572° , 4 — 683°

температуре 170° эти равновесные значения устанавливаются за время порядка 1 мин. За это же время происходило и установление равновесной величины $\gamma_{\text{в}}$ в максимуме при $\varphi_2 = -26^\circ$ (рис. 2, 3), которое в отличие от предыдущего случая меньше величины $\gamma_{\text{в}}$, измеренной в первые секунды. (Отметим, что переход в этот максимум осуществляется из минимума, соответствующего направлению $\langle 111 \rangle$).

Здесь же показаны изменения $\gamma_{\text{в}}$ во времени, полученные при $T = 420^\circ$ (рис. 2, 1', 2', 3'). Видно, что при этой температуре процессы установления $\gamma_{\text{в}}$ происходят значительно быстрее (25—40 сек.).

Аналогичные процессы происходят и в монокристалле Ge. На рис. 3 показаны временные изменения $\gamma_{\text{в}}$ в направлении $\langle 111 \rangle$ при четырех различных температурах. С ростом температуры время установления равновесного значения $\gamma_{\text{в}}$ уменьшается, а при температуре 683° эффект «заплывания» канала практически не наблюдается.

Как показали проведенные эксперименты, характер изменения временных зависимостей в сильной степени зависит от предыстории облучения образца, т. е. от угла φ_1 , под которым происходила бомбардировка образца перед совпадением направления падения пучка с исследуемым кристаллографическим направлением (в максимуме или минимуме кривой угловой зависимости), а также и от того, насколько близки были этим минимумы или максимумы к выбранному каналу (рис. 4).

При всех переходах кривые, как правило, приходят к одному и тому же значению равновесной величины $\gamma_{\text{в}}$. Наблюдаемое небольшое отклонение кривой 1 (рис. 4а) может быть связано с менее точной установкой угла падения ионов.

Наиболее сильные временные изменения $\gamma_{\text{в}}$ происходят в случае переходов из максимума в минимум (рис. 4в, 5, рис. 4б, 1, 5). Особенно сильно

уменьшается эффект «запыливания» канала при переходе к данному направлению из близкого минимума (рис. 4в, 4; 4б, 6). Интересным представляется также изменение γ_s во времени для максимума кривой $\gamma_s(\varphi)$ при $\varphi_2 = 14^\circ$. Как видно из рисунка, при переходе к этому направлению как из минимума $\varphi_1 = 54^\circ$, так и из направления $\varphi_1 = 58^\circ$, т. е. из скользких направлений первоначальной бомбардировки, γ_s растет во времени (рис. 4а, 1, 2), а при переходе из минимумов при $\varphi_1 = 0$ (рис. 4а, 6) и $\varphi_1 = 20^\circ$ (рис. 4а, 3) γ_s сначала растет, а затем начинает падать.

Характерной особенностью кривых, полученных при бомбардировке Ge, является немонотонный характер перехода от начального к равновесному значению γ_{sp} . Такое поведение γ

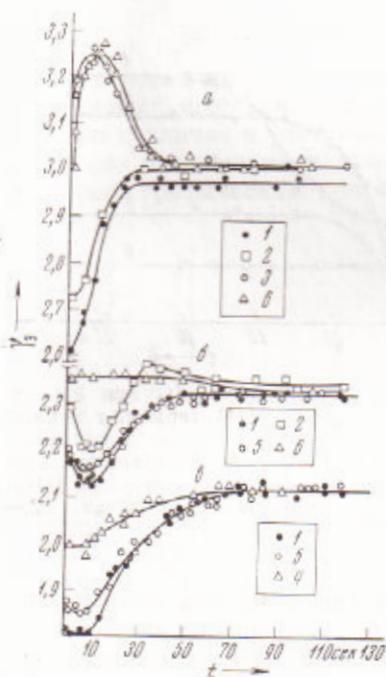


Рис. 4. Зависимости $\gamma_s(t)$ при бомбардировке грани (111) германия ионами аргона с энергией 70 кэВ. Переходы осуществлялись в плоскости {110}. а — переход при $T = 329^\circ$ к $\varphi_2 = 14^\circ$, б — при $T = 445^\circ$ к $\varphi_2 = 20^\circ$, в — при $T = 445^\circ$ к $\varphi_2 = 0^\circ$ от $\varphi_1 = 58^\circ$ (1), 54° (2), 20° (3), 18° (4), 14° (5), 0° (6)

чина γ_s должна возрастать по сравнению с ее первоначальным значением.

Иной характер влияния на величину γ_s может быть обусловлен внедрением атомов аргона. В результате торможения падающих ионов в поверхностных слоях кристалла при бомбардировке его в менее прозрачном направлении на образование всякого рода дефектов (вакансии, внедренные атомы, термочки и т. п.) выделяется большее количество энергии, чем при бомбардировке его в более прозрачном направлении. Это обстоятельство при бомбардировке в менее прозрачном направлении должно приводить за счет различных процессов радиационно-стимулированной диффузии⁽⁴⁾ к относительно большим коэффициентам диффузии атомов аргона, облегчать их выход из кристалла и, в конечном итоге, приводить к относительно меньшей величине их стационарной концентрации в приповерхностных слоях. К этому же выводу приводит и учет эффекта отражения ионов (см. ⁽⁵⁾), в соответствии с которым при бомбардировке кристалла в менее прозрачном направлении в мишень внедряется меньшее количе-

ство ионов. Такое поведение γ может свидетельствовать о наличии в поверхностном слое двух различных процессов релаксации, влияющих на прозрачность мишени различным образом. Возможно, что такими релаксационными процессами могут быть процессы установления концентрации радиационных дефектов (атомы внедрения мишени и вакансии) и внедренных в решетку атомов Ag, соответствующих равновесному состоянию. Естественно считать, что при бомбардировке мишени в менее прозрачном направлении, поверхностная концентрация атомов мишени, находящихся в междоузлиях, в приповерхностном слое выше, чем в том случае, когда бомбардировка осуществляется в более прозрачном направлении. Поэтому при изменении направления пучка ионов от менее прозрачного к более прозрачному направлению, концентрация таких дефектов должна убывать, стремясь к своему равновесному значению, а прозрачность канала при этом должна увеличиваться. Следовательно, в этом случае механизм релаксации подобного рода дефектов должен приводить к уменьшению величины γ_s по сравнению с его первоначальным значением. Из тех же соображений следует, что при переходе от более прозрачного к менее прозрачному направлению величина γ_s должна возрастать по сравнению с ее первоначальным значением.

ство атомов аргона, чем при бомбардировке в более прозрачном направлении.

Поскольку внедренные атомы аргона, так же как и атомы мишени, находящиеся в междоузлиях, должны уменьшать прозрачность каналов, то при переходе пучка ионов из менее прозрачного направления в более прозрачное, концентрация атомов Ar в приповерхностном слое должна увеличиваться, прозрачность канала уменьшаться, а значение γ , увеличиваться до своего равновесного значения $\gamma_{\text{эп}}$. Ясно, что обратная картина должна наблюдаться при переходе от более прозрачного направления в менее прозрачное.

Из полученных нами экспериментальных данных можно по порядку величины оценить величину коэффициента диффузии атомов аргона в исследуемых кристаллах.

Как уже указывалось, при переходе от более прозрачного к менее прозрачному направлению установление равновесного значения γ , обусловлено диффузионным рассасыванием избыточной концентрации атомов аргона. Время этого рассасывания $\tau = l^2 / D$, где D — коэффициент диффузии атомов аргона, а l — размер области приповерхностного слоя, в котором, в основном, они сосредоточены. Согласно (8), $l \approx 300 \text{ \AA}$. В то же время из наших измерений следует, что при температуре 445° $\tau = 60$ сек. Следовательно, для коэффициента диффузии по порядку величины получаем $D \approx 9 \cdot 10^{-12} / 60 = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{сек}$.

С повышением температуры увеличиваются скорости отжига и коэффициенты диффузии радиационных дефектов и внедренных атомов аргона. Поэтому время установления равновесных значений γ , должно уменьшаться. Последнее действительно наблюдалось нами для всех исследуемых образцов (рис. 2, 3).

Авторы глубоко признательны В. М. Аграновичу, а также Э. Я. Михлину, В. А. Молчанову и Ю. В. Мартыненко за полезные дискуссии, В. Г. Радионовой, Л. А. Ждамировой, А. И. Степуре, Г. Г. Гунину, С. И. Куташеву и Г. Г. Игнатову за помощь в работе.

Поступило
30 IX 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Я. Лебедев, В. Е. Дубинский, О. И. Капуста, В. И. Кротов, Н. М. Омеляновская, С. Д. Панин, Приборы и техн. эксп., № 4, 225 (1968).
² О. И. Капуста, С. Я. Лебедев, Н. М. Омеляновская, ФТТ, 12, № 4, 995 (1970).
³ О. И. Капуста, С. Я. Лебедев, Н. М. Омеляновская, Изв. АН СССР, сер. физ., XXXV, № 2, 261 (1971).
⁴ Дж. Динс, Дж. Виньярд, Радиационные эффекты в твердых телах, ИЛ, 1960, стр. 135.
⁵ K. S. Nelson, M. W. Thompson, Phys. Mag., 8, № 94, 1677 (1963).
⁶ H. Lutz, R. Sizmann, Phys. Lett., 5, 113 (1963).