

ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

А.М. Афанасьев, Э.К. Ковьев, А.С. Фокин

Проведены исследования фотоэлектрической электродвижущей силы (фотоэдс), возникающей при облучении полупроводниковых кристаллов с p - n -переходом рентгеновскими лучами в условиях, когда последние испытывают дифракцию на кристаллической решетке.

В процессе поглощения рентгеновских лучей в полупроводниковых кристаллах большая часть энергии затрачивается на генерацию электронов и дырок. Если в кристалле имеется p - n -переход, то под действием его поля носители пространственно разделяются, что приводит к накоплению в обеих областях перехода зарядов противоположного знака — т. е. к появлению фотоэдс ϵ . Известно, что поглощение рентгеновских лучей в кристалле сильно зависит от угла падения на кристалл $\Theta = \theta - \theta_B$ вблизи углов, соответствующих брэгговской дифракции. Это находит свое яркое отражение в угловой зависимости выхода вторичных излучений (фотоэлектронов, флюоресцентного излучения и т. п.), возникающих в процессе поглощения рентгеновских лучей (см. работу [1] и ссылки в ней). Аналогичного поведения можно ожидать и для зависимости $\epsilon(\Theta)$. Проведение таких исследований требует монохроматизации и довольно высокой угловой коллимации (\sim нескольких секунд) рентгеновских лучей, что приводит к резкому уменьшению интенсивности падающего на кристалл пучка. Возникают опасения, что при таких слабых потоках наводимая фотоэдс окажется ничтожно малой и ее невозможно зафиксировать. Однако, как показало настоящее исследование, возникающая фотоэдс не только доступна измерениям, но и по этим измерениям можно проследить характер зависимости $\epsilon(\Theta)$.

Измерения фотоэдс проводились на образцах кремния с p - n -переходом, параллельным поверхности. Использовался высокоомный материал p -типа. На глубину ~ 2 мкм проводилась диффузия атомов фосфора с поверхностной концентрацией $\sim 10^{20}$ ат/см³. Толщина p -области составляла 300 мкм. На обеих поверхностях пластины в центре наносили точечные омические контакты. Образец устанавливался в специальную гониометрическую головку, электрически изолированную от корпуса гониометра, и экранировался от воздействия внешнего излучения. Измерения электрического напряжения проводились цифровым микровольтметром с чувствительностью по напряжению $\sim 0,1$ мкВ. Кривые дифракционного отражения $R(\Theta)$ и фотоэдс $\epsilon(\Theta)$ регистрировались на двухкристалльном спектрометре в параллельном положении кристаллов (рис.1). В качестве монохроматора использовали кристалл германия с ориентацией поверхности в направлении $\langle 110 \rangle$. Режим работы трубки составлял: $U = 40$ кВ, $I = 9$ мА. При площади падающего пучка $0,01 \times 0,5$ см² интенсивность достигала значений $10^5 \div 10^6$ имп/сек. Использовалось CuK_α -излучение.

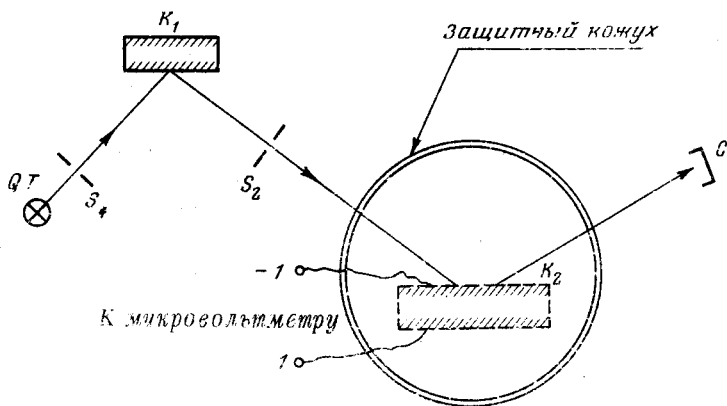


Рис. 1. Схема эксперимента: θ_T — рентгеновская трубка; S_1 и S_2 — щели; K_1 и K_2 — кристалл-монокроматор и исследуемый кристалл; C — счетчик излучения

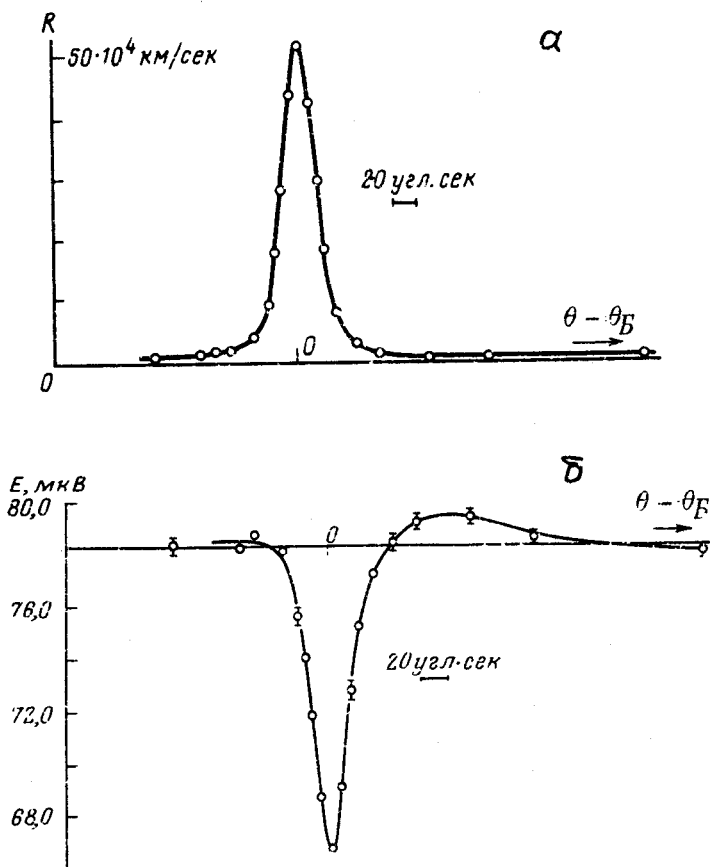


Рис. 2. Угловая зависимость фотоэда: а — кривая отражения рентгеновских лучей; б — кривая $\epsilon(\theta)$

На рис. 2 представлены (111) — кривая отражения и соответствующая ей угловая зависимость $\epsilon(\Theta)$, измеренные в геометрии брэгг-дифракции, при комнатной температуре. Входной поверхностью для излучения являлась n -область кристалла. Обращают на себя внимание две особенности на кривой $\epsilon(\Theta)$. Во-первых, — это наличие сильного провала в области углов, где имеет место дифракция рентгеновских лучей, а во-вторых, кривая $\epsilon(\Theta)$ имеет четко выраженную асимметрию, в то время как кривая дифракционного отражения $R(\Theta)$ симметрична. Наличие провала объясняется просто. Там, где имеется сильное дифракционное отражение рентгеновских лучей, меньшая часть интенсивности проникает вглубь кристалла, а следовательно — меньше генерируется носителей. Асимметрия кривой связана с более тонким физическим обстоятельством. Ранее при изучении вторичного флюоресцентного излучения, как раз и наблюдались подобные зависимости. Типичная кривая выхода флюоресцентного излучения представлена на рис. 3, которая по своей форме довольно близко напоминает кривую $\epsilon(\Theta)$. Природа асимметрии флюоресцентных кривых хорошо известна. Асимметрия связана с конечностью длины выхода флюоресцентного излучения из кристалла ([1, 2]). В случае же фотоэда аналогичным параметром, определяющим асимметрию кривой, является длина L_D , которую носители проходят за время жизни τ за счет диффузионного движения: $L_D = \sqrt{2D\tau}$, где D — коэффициент диффузии. С другой стороны по виду зависимости $\epsilon(\Theta)$ можно относительно просто определить саму величину L_D . Нами проведены оценки L_D по формулам (6) ÷ (13) работы [1], с заменой длины выхода флюоресцентного излучения на L_D , т. е. $P_A(z) = e^{-z/L_D}$.

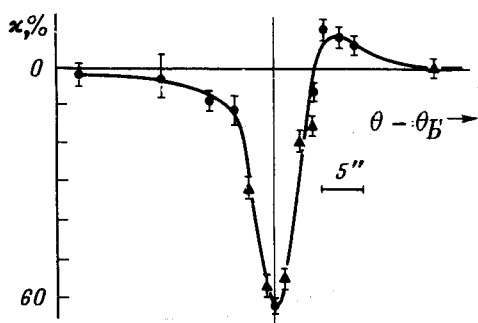


Рис. 3. Угловая зависимость относительного квантового выхода флюоресцентного излучения: кристаллы сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,2$). Одновременная регистрация GeK_β и GeK_α линий. Угол наклона счетчика относительно поверхности образца равен 20°

С учетом конечности углового интервала отраженных от первого кристалл-монокроматора рентгеновских лучей расчеты дали значение $L_D = 53$ мкм. По электрофизическим измерениям $L_D = 68$ мкм. В данном случае мы имеем довольно хорошее согласие и, тем самым, — демонстрацию реальных возможностей определения диффузионной длины из кривых $\epsilon(\Theta)$.

Экспериментально обнаружено, что величина $\epsilon(\Theta)$ резко возрастает с уменьшением температуры кристалла. При этом значение фотоэда возрастает в $10^1 \div 10^2$ раз при ее уменьшении до значения — 183°C . Обнаружена также чувствительность кривых $\epsilon(\Theta)$ к наличию магнитного поля с вектором напряженности параллельном плоскости p - n -перехода.

Эти особенности поведения фотоэда позволяют надеяться, что наблюдаемый эффект может стать эффективным средством исследования широкого класса электрических свойств кристаллов, а также характеристик p - n -переходов.

В заключение авторы выражают свою признательность Р.М.Имамову и С.А.Семилетову за интерес к настоящим исследованиям и В.Б.Батурину за помощь в измерении флюоресцентного излучения.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Научно-исследовательский
институт "Сапфир"

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
10 июля 1978 г.

Литература

- [1] А.М.Афанасьев, В.Г.Кон. ЖЭТФ, 74, 300, 1978.
[2] В.В.Ваттерман. Phys. Rev., 133, A759, 1964; Phys. Rev. Lett., 22, 703, 1969.
-