

СТРУКТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КРИВЫХ ФОТОЭДС В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ СТОЯЧЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ С p - n -ПЕРЕХОДОМ

Ковальчук М. В., Кон В. Г., Лобанович Э. Ф.

Впервые зафиксирована фазовая чувствительность кривых угловой зависимости фотоэдс, возбужденной стоячей рентгеновской волной, а также продемонстрирована возможность изучения сложных эффектов влияния структурного несовершенства и деформации полупроводникового кристалла на его электрофизические свойства на примере (111)-дифракции CuK_α -излучения в кристалле кремния с диффузионным слоем фосфора.

Ранее в работах [1-4] было показано, что путем измерения угловой зависимости фотоэдс в полупроводниковых кристаллах с p - n -переходом в условиях динамической дифракции рентгеновских лучей можно изучать взаимосвязь структурных и электрофизических характеристик кристалла. Такой подход составляет основу новой модификации метода стоячих рентгеновских волн [5]. При этом, как и в любой модификации метода стоячих волн, необходимо, чтобы толщина слоя, дающего вклад в регистрируемый сигнал L_{yi} , была значительно меньше глубины проникновения рентгеновских лучей в исследуемый кристалл L_A . Для получения наглядной структурной информации необходимо выполнить более сильное условие $L_{yi} \ll L_{ex}$, где L_{ex} — длина экстинкции.

Во всех ранних работах последнее условие выполнялось плохо, поскольку в исследованных образцах диффузионная длина неосновных носителей заряда L_D , играющая в данном случае роль параметра L_{yi} , значительно превосходила длину экстинкции. Один путь решения проблемы экстинкции — выбор образцов с малым значением L_D , как это было сделано в [6], другой — изменение L_D при введении дефектов в образец либо при упругой деформации.

Хорошо известно, что дефекты или упругая деформация образца изменяют не только его структурное совершенство, но и электрофизические характеристики, в первую очередь рекомбинационные свойства [7]. Исходя из этого был поставлен специальный эксперимент с целью демонстрации возможности наблюдения взаимосвязи структурных и электрофизических характеристик полупроводниковых приборов методом стоячих рентгеновских волн в случае внутреннего фотоэффекта. Исследуемый образец был приготовлен следующим образом. В пластину кремния (КДБ-10 с концентрацией $B \sim 10^{16}$ ат/см³) толщиной 380 мкм при $T=980$ °C была проведена диффузия фосфора на глубину 0.5 мкм с объемной концентрацией $\sim 10^{21}$ ат/см³. Затем с половины площади образца диффузионный слой был травлен. При этом образец деформировался таким образом, что его кривизна непрерывно изменялась, возрастая по мере удаления от границы раздела: область травления — диффузионная пленка (рис. 1).

Угловая зависимость фотоэдс измерялась в нескольких точках вдоль поверхности образца, показанных на рис. 1. Полученные кривые представлены на рис. 2. Использовалась обычная двухкристальная симметричная бездисперсионная схема эксперимента [5]. (111) — отражение CuK_α -излучения. Легко заметить, что все кривые различаются как по форме, так и по величине фонового (вне угла Брэгга) сигнала. Фоновый сигнал имеет максимальную величину

в точке 3, на некотором удалении от границы раздела. Вблизи самой границы он имеет минимальную величину, затем по мере удаления от нее быстро возрастает, рост продолжается до точки 3. При еще большем удалении величина фонового сигнала медленно уменьшается.

Так как рентгенодифракционные параметры во всех измерениях совпадали, изменение формы кривых и фонового сигнала было связано только с изменением деформации и электрофизических свойств кристалла в области сбора измеряемого сигнала фотоэда. Так, вне угла Брэгга фотоэдс приближенно описывается формулой $U_{\phi} = CL_A L_{yi} / (L_A + L_{yi})$, где C — константа, $L_A = \gamma_0 / \mu_0 = 17$ мкм. Поскольку $L_{yi} < L_A$ во всех точках, изменение U_{ϕ} почти прямо пропорционально L_{yi} . Уменьшение фонового сигнала сопровождается усилением асим-

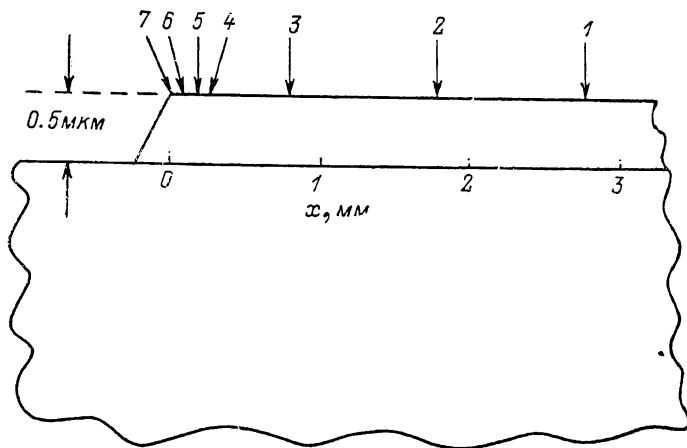


Рис. 1. Схема поверхностного слоя исследуемого образца.

Указаны точки засветки (1—7) образца рентгеновским пучком, в которых измерялась угловая зависимость фотоэда. Для наглядности вертикальный масштаб в 1000 раз превосходит горизонтальный.

метрии кривых, которые в точках 5 и 6 уже имеют резко выраженный дисперсионный характер, присущий кривым угловой зависимости фотоэмиссии, когда $L_{yi} < L_{ex}$. В данном случае $L_{ex} = 1.51$ мкм. Это говорит о том, что вблизи границы раздела область сбора регистрируемого сигнала резко уменьшается.

Такое поведение кривых может быть связано с характером распределения напряжений в образце. Высокая концентрация атомов фосфора в поверхностном слое вызывает значительное несоответствие периодов решетки слоя и подложки, в результате чего на границе слой—подложка возникают сильные напряжения, которые частично компенсируются изгибом образца. Однако, поскольку в нашем случае с половины площади диффузионный слой удален, этот изгиб оказывается неоднородным. Вблизи границы области травления (точки 4—7) изгиб практически отсутствует, деформация подложки минимальна, а напряжения сконцентрированы на горизонтальной границе диффузионный слой—подложка. Напряжения на границе приводят к резкому увеличению рекомбинации носителей. При этом, хотя длина диффузии в недеформированной подложке велика, носители заряда не достигают области p — n -перехода, рекомбинируя в напряженной области границы, а фотоэдс формируется носителями, образовавшимися в приповерхностном слое, в непосредственной близости от p — n -перехода.

Сложный характер деформации в образце не позволяет полностью описать механизм формирования кривых. В терминах когерентной позиции и когерентной фракции (см., например, [5]) можно сразу сказать, что атомы кристалла в области сбора сигнала смещены относительно атомов совершенной подложки в среднем на половину межплоскостного расстояния (111), поскольку кривые имеют обращенную по отношению к нормальным кривым форму. Таким образом, впервые зафиксирована фазовая чувствительность кривых угловой зависимости фотоэда.

При удалении от границы области травления (точки 1—3) рекомбинация носителей в напряженной области уменьшается, что приводит к росту регистрируемого сигнала, который в дальнейшем снова падает из-за уменьшения длины диффузии неосновных носителей заряда в подложке по мере увеличения ее изгиба. В точке 1 характер кривой фотоэдс уже довольно сложен, в частности провал на кривой сдвинут по углу относительно области максимального отраже-

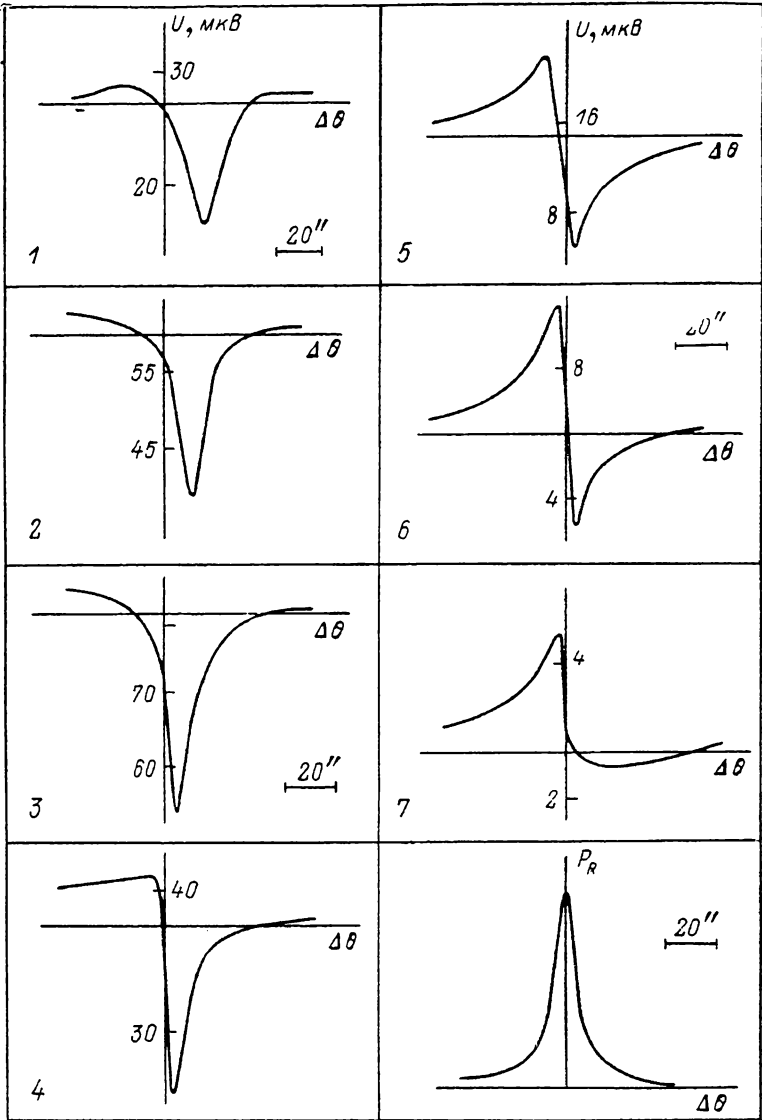


Рис. 2. Кривые угловой зависимости фотоэдс в условиях дифракции рентгеновских лучей, измеренные при засветке образца в различных точках поверхности, показанных на рис. 1, а также интенсивность отраженного рентгеновского пучка (в произв. ед.).

ния рентгеновских лучей. Такой характер кривой невозможно описать в терминах когерентных позиции и фракции. Здесь наряду со смещением атомов из правильных положений необходимо принимать во внимание изменение характеристик самой стоячей рентгеновской волны в деформированной области.

Описанный выше характер деформации образца подтверждается и величиной максимального отражения рентгеновских лучей (рис. 2). Проведенное исследование демонстрирует практическую возможность анализа взаимосвязи структурного совершенства и электрофизических характеристик в активной области барьерных структур полупроводников.

К такому же выводу приводят результаты другого эксперимента, выполненного с тем же образцом. На рис. 3, а показана кривая угловой зависимости фотоэдс, снятая вдали от границы области травления (вблизи точки 1 на рис. 2). После этого образец был подвержен отжигу при $T=1050^\circ\text{C}$ в течение 10 мин и снова записана кривая фотоэдс (рис. 3, б). Видно резкое изменение кривой: возросла фоновая интенсивность, положение минимума сдвинулось и совпало с максимумом отражения рентгеновских лучей, изменилась на противоположную асимметрия хвостов кривой. Кривая приобрела нормальный вид, соответствующий выходу вторичного излучения с глубиной выхода L_{yi} в интервале $L_{ex} < L_{yi} < L_A$. Отсюда сразу можно сделать вывод, что отжиг образца, увеличив диффузию примесных атомов в глубь образца, привел к значительному уменьшению деформации, связанной с изгибом.

На рис. 3, в показана кривая для той же точки образца, но после отжига в течение 30 мин. Кривая также имеет форму, соответствующую идеальному кристаллу, но при условии $L_{yi} > L_A$, т. е. более длительный отжиг привел к еще большему увеличению длины диффузии носителей заряда в образце.

Таким образом, полученные нами результаты ясно показывают возможности модификации метода стоячих рентгеновских волн, основанной на измерении фотоэдс на барьерных полупроводниковых структурах для изучения взаимосвязи их структурных и электрофизических характеристик. Количественная интерпретация этих результатов затруднена из-за отсутствия теории внутреннего фотоэффекта при динамической дифракции рентгеновских лучей в искажениях, в частности в изогнутых кристаллах, а также из-за недостаточной информации об областях формирования ЭДС в разных точках образца. Необходимо продолжать как экспериментальные, так и теоретические исследования в этом направлении.

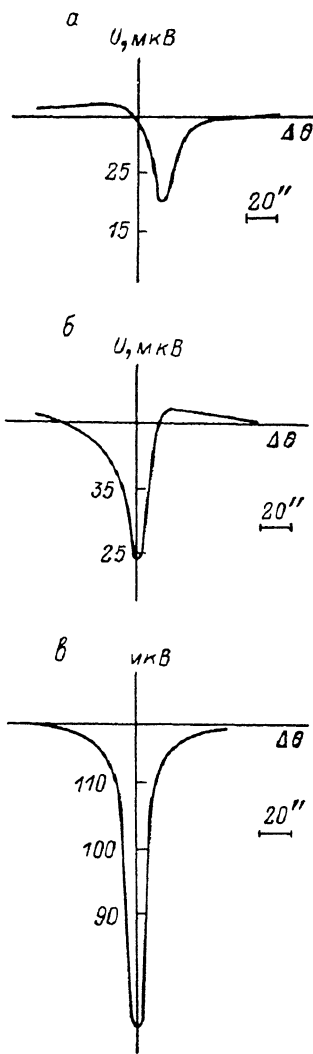


Рис. 3. Кривые угловой зависимости фотоэдс при дифракции рентгеновских лучей в кристалле кремния с $p-n$ -переходом, подверженном отжигу при температуре 1050°C в течение различного времени t .

t , мин: а — 0, б — 10, в — 30.

Список литературы

- [1] Фокин А. С. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1977. № 8 (118). С. 59—61.
- [2] Афанасьев А. М., Ковьев Э. К., Фокин А. С. // Письма ЖЭТФ. 1978. Т. 28. В. 6. С. 348—351.
- [3] Zheludeva S. I., Kovalchuk M. V., Kohn V. G. // J. Phys. C. 1985. V. 18. N 11. P. 2287—2304.
- [4] Жалудева С. И., Ковальчук М. В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 9. С. 1597—1604.
- [5] Ковальчук М. В., Коц В. Г. // УФН. 1986. Т. 149. В. 1. С. 69—103.
- [6] Бедзик М., Ковальчук М. В., Матерлик Г., Жалудева С. И., Захаров Б. Г., Функе П. // ДАН СССР. 1985. Т. 282. В. 1. С. 76—79.
- [7] Подякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М., 1979. 167 с.