

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ В Ge, ЛЕГИРОВАННОМ ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

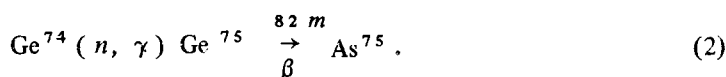
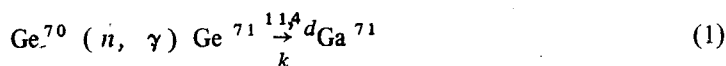
Ю.А.Осипьян, В.М.Прокопенко, В.И.Тальянский

Дислокационная СВЧ проводимость Ge, обнаруженная в^{1,2}, изучается в образцах легированных облучением тепловыми нейтронами. Такой способ легирования позволил проводить измерения в условиях однородного распределения легирующей примеси и установить корреляцию между величиной СВЧ проводимости и количеством носителей тока, захваченных дислокациями.

В работах^{1,2,3} было обнаружено, что введение дислокаций (Д) в монокристаллы Ge приводит к новому механизму проводимости в СВЧ диапазоне. (Эту проводимость мы в дальнейшем будем называть дислокационной проводимостью — ДП).

При достаточно низких температурах (≤ 10 К), когда в зонах нет свободных носителей ДП становится доминирующей и легко наблюдается экспериментально. Оказалось, что величина ДП зависит от легирования образца мелкими донорами или акцепторами и исчезает в нелегированных образцах. В соответствии с существующими представлениями⁴ это может быть объяснено захватом на дислокационные состояния дополнительных электронов или дырок и движением их под действием СВЧ поля вдоль отрезков дислокационных линий. В частности, в работе³ было показано, что в случае анизотропной дислокационной структуры ДП также анизотропна. Однако, несмотря на значительное продвижение в изучении ДП, экспериментальные результаты^{1,2,3} оказались все же недостаточны для того, чтобы сделать окончательный вывод о механизме ДП. Наиболее вероятным представляется собственно дислокационный механизм: СВЧ проводимость обусловлена движением носителей (электронов или дырок), захваченных Д., вдоль ядер Д. В этом случае Д можно рассматривать как одномерные проводники, распределенные в объеме кристалла. Однако, данные¹⁻³ не позволяют полностью исключить и другой механизм ДП, при котором роль Д. является отличной от упомянутой выше. В процессе пластической деформации кристалла и последующего отжига¹ (температуры 460 и 700° С соответственно) может происходить диффузия мелких легирующих примесей в упругих полях Д. Таким образом, не исключено, что в окрестности дислокаций могли бы (по крайней мере в принципе) образовываться области, в которых концентрация примесей на несколько порядков превышает среднюю. (В¹⁻³ использовались кристаллы Ge *n*- и *p*-типа с концентрацией мелких примесей $\sim 10^{13}$ см⁻³). В подобном случае в образовавшихся областях сильного легирования носители могли быть вырождены, что могло привести к появлению СВЧ проводимости. Из сказанного ясно, что если бы удалось приготовить образцы Ge с Д и с заведомо однородным распределением мелких примесей, то можно было бы сделать выбор между этими альтернативными механизмами ДП.

В данной работе предпринята попытка решить проблему с помощью метода нейтронного легирования Ge⁵. При облучении тепловыми нейтронами некоторые изотопы Ge, захватывая нейтроны, становятся нестабильными и, распадаясь, превращаются в элементы III и V групп. Основными являются следующие процессы:



Первая формула описывает появление акцепторов, вторая — доноров. Изотоп Ge⁷⁰, захватив нейтрон, превращается в нестабильный изотоп Ge⁷¹. Ge⁷¹ превращается в результате K -захвата (с периодом полураспада 11,4 дней⁵ в Ga⁷¹. Формула (2) описывает превращение Ge⁷⁴ в As⁷⁵. Это превращение происходит следующим образом: изотоп Ge⁷⁴ захватив нейтрон

превращается в радиоактивный изотоп Ge^{75} , который в свою очередь в результате β -распада (с периодом полураспада 82 минуты) превращается в As^{75} . Значения периодов полураспада таковы, что к началу измерений (т.е. на 2-ые или 3-и сутки после облучения) концентрация доноров достигала своего максимального значения, в то время как концентрация акцепторов росла на протяжении нескольких месяцев. Через 5, 8 суток происходит полная компенсация, а окончательные концентрации акцепторов и доноров относятся как $\sim 3 : 1$. Идея данной работы состояла в том, чтобы поменять очередность во времени двух операций: введение в кристалл Д и легирование кристалла, мы вводили Д в монокристаллы сверхчистого n -Ge (концентрация доноров $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$). Методика деформирования и последующего отжига аналогичны описанным в ¹. Исследовались обычно образцы с плотностью Д $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$.

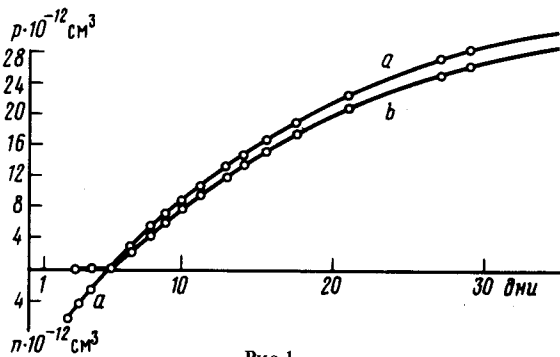


Рис.1

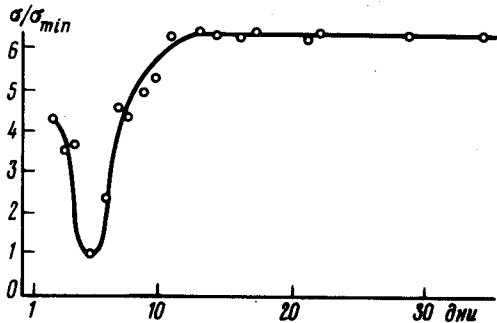


Рис.2

Рис.1. Зависимость концентрации носителей в зонах от времени с момента облучения. Измерения проводились при 77 К. Кривая *a* — зависимость для контрольного образца с исходной (до облучения) концентрацией мелких доноров $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, кривая *b* — зависимость для образца с плотностью дислокаций $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

Рис.2. Зависимость СВЧ проводимости от времени с момента облучения. Измерения проводились при 4,2 К. Проводимость нормирована к своему минимальному значению σ_{min} . Плотность дислокаций в образце $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Образец облучался таким же потоком, как и образцы на рис.1

После деформации СВЧ ДП в образцах отсутствовала, что объясняется чрезвычайно малой концентрацией доноров в исходных образцах ². Затем мы покрывали образцы защитным слоем олова и облучали в канале реактора (с отношением числа тепловых нейтронов к быстрым $\sim 300 : 1$). Время облучения (8 ÷ 20 мин) выбиралось таким, чтобы окончательная концентрация введенных акцепторов была $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Вместе с деформированными облучались и контрольные образцы. После облучения образцы отжигались при температуре $\sim 500^\circ \text{C}$ в течение 7–8 часов для устранения введенных при облучении структурных дефектов, возникающих, в основном, из-за наличия в пучке реактора быстрых нейтронов. На первый взгляд этот вынужденный отжиг сводит на нет преимущество метода нейтронного легирования, так как можно опасаться, что во время отжига мелкие примеси подтягиваются к Д. Однако эти опасения справедливы лишь в отношении доноров, что же касается акцепторов, то они практически еще не успевают образоваться к моменту окончания отжига. Игак, к началу измерений мы имели образцы с концентрацией доноров 10^{13} см^{-3} (относительно равномерности распределения которых мы, из-за проведенного отжига ничего утверждать не можем) и в этих образцах каждые сутки рождались $\sim 10^{12}$ акцепторов (Ga^{71}) в см^3 , причем акцепторы возникают совершенно равномерно по объему образца. Методика измерения СВЧ проводимости кратко описана в ³. Параллельно с измерениями СВЧ проводимости при 4,2 К, измерялся эффект Холла на постоянном токе при температуре 77 К и определялась концентрация доноров и акцепторов. На рис.1 приведены результаты холловских измерений для контрольного (*a*) и деформированного (*b*) образцов Ge в зависимости от времени с момента облучения. Различие в поведении кривых *a* и *b* на рис.1 для первых 5 суток связано с акцепторным действием Д, донорное же действие Д, при такой их концентрации не проявляется при 77 К ⁶. На

рис.2 приведены результаты измерений СВЧ проводимости образца с Д при $T = 4,2$ К. Видно, что кривая имеет отчетливый минимум на 5-ые сутки после облучения, т.е. в тот момент когда (как видно из рис.1, а) введенные облучением доноры и акцепторы компенсируют друг друга. Полученная зависимость имеет как раз такой вид, какой следовало ожидать на основании результатов ^{1,2}, если считать, что ДП в ^{1,2} связана с движением носителей тока вдоль Д, а не с локальными скоплениями легирующей примеси. Действительно, начальное падение величины ДП на рис.2 объясняется уменьшением числа нескомпенсированных доноров, а значит и числа электронов, перешедших на Д с доноров. Следующий за этим рост СВЧ проводимости связан с ростом числа дырок, захваченных Д с акцепторов. Насыщение ДП наступит, когда коэффициент заполнения Д, дырками достигает максимума и число дырок на Д перестает расти, несмотря на то, что концентрация акцепторов в объеме образца продолжает увеличиваться. С другой стороны, если предполагать, что исходная СВЧ проводимость образца связана с возникновением в процессе отжига областей в которых концентрация доноров на много порядков превышает среднюю, то появление в дальнейшем равномерно по образцу акцепторов с концентрацией $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ не должно было бы заметно менять СВЧ проводимость. Итак, подводя итог, можно сказать, что в данной работе удалось наблюдать ДП в условиях заведомо однородного распределения легирующих примесей (Ga^{71}), что свидетельствует в пользу механизма проводимости вдоль ядер Д.

В заключение авторы выражают благодарность С.Гелаховой за помощь в проведении эксперимента.

Литература

1. Осипьян Ю.А., Тальянский В.И., Шевченко С.А. ЖЭТФ, 1977, 72, 1543.
2. Осипьян Ю.А., Тальянский В.И., Харламов А.А., Шевченко С.А. ЖЭТФ, 1979, 76, 1655.
3. Осипьян Ю.А., Прокопенко В.М., Тальянский В.И., Харламов А.А., Шевченко С.А. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 123.
4. Ossipjan Yu. A. Crystal Res. and Techn. 1981, v. 16, N 2.
5. Забродский А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 258.
6. Schröter W. Phys. Stat. Sol., 1967, 21, 211.