

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГЕРМАНИЯ

**Ильясова Г.В., Вахрин В.В.,
научный руководитель канд. техн. наук Подкопаев О.И.
Сибирский федеральный университет**

В настоящее время востребованы материалы с уникальным сочетанием электро-физико-механических свойств. Монокристаллы германия с минимальным содержанием дефектов и примесей имеют колоссальную перспективу в связи с развитием полупроводниковых нанотехнологий.

Бездислокационный германий обеспечивает решение проблем, которые возникают в связи с использованием кремния при создании наноразмерных транзисторных структур. Высокая подвижность носителей заряда, достигающая $2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (в 2 раза выше, чем в Si), позволяет с большим успехом использовать его для создания быстродействующих ячеек памяти.

Малодислокационный особо чистый германий HPGe (High-Purity Germanium), или ОЧГ необходим для производства радиационностойких фотоэлектрических детекторов, где требуются кристаллы с содержанием линейных дефектов порядка 100 см^{-2} и концентрацией электрически активных примесей на уровне $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Одной из проблем производства особо чистого германия (ОЧГ) является контроль примесей, содержание которых находится на уровне чувствительности современных аналитических приборов. Это обстоятельство обусловило использование косвенных методов для определения концентрации примесей, например, четырехзондового метода измерения удельной электрической проводимости. Электрические измерения осуществляют при низких температурах от 100 до 200 К, соответствующих области истощения примесей, и проводят их на каждой стадии очистки германия, как на монокристаллических, так и на поликристаллических образцах. В связи с этим интерес представляет вопрос о взаимосвязи электропроводности и структурных характеристик кристаллов германия.

Эксперименты проводили на образцах двух типов, - оптического германия марки ГПО с содержанием примесей $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а также на образцах ОЧГ с концентрацией электрически активных примесей на уровне 10^{10} см^{-3} .

Из поликристаллической пластины № 29-12 вырезались квадратные образцы $20 \times 20 \text{ мм}$ высотой 10 мм. Удельное электрическое сопротивление образцов измерялось четырехзондовым методом. Микроструктуру образцов выявляли путем травления в смеси азотной и плавиковой кислоты состава 3:1. Размеры зерен анализировались на микроскопе Nikon Epihot 300. Характеристики поликристаллических образцов марки ГМО представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики поликристаллических образцов марки ГМО

№ образца	Размер зерен, мм	ρ , Ом \times см	σ , Ом $^{-1}$ см $^{-1}$
1	5,3	17,54	0,0570
2	4,0	20,08	0,0498
3	3,7	28,01	0,0357
4	5,1	17,79	0,0562
5	7,5	13,40	0,0746
6	3,95	22,78	0,0439
7	3,85	23,15	0,0432
8	4,15	19,96	0,0501

Из поликристаллических слитков вырезались квадратные образцы марки ОЧГ 12x12мм высотой 1,1мм. Микроструктуру образцов выявляли путем травления в смеси азотной и плавиковой кислоты состава 3:1. Размеры зерен анализировались на микроскопе NikonEpihot 300. Затем образцы анализировались на установке для измерения эффекта Холла EsoriaHMS-5000. Проводилось измерение среднего удельного сопротивления образца в температурном интервале от 80 до 300К.

На рисунке 1 приведены графики зависимости удельной электрической проводимости от температуры образцов германия после зонной очистки, соответствующих по содержанию примесей (на уровне 10^{10} см^{-3}) типу ОЧГ, имеющих различное строение, определяемое размерами кристаллитов.

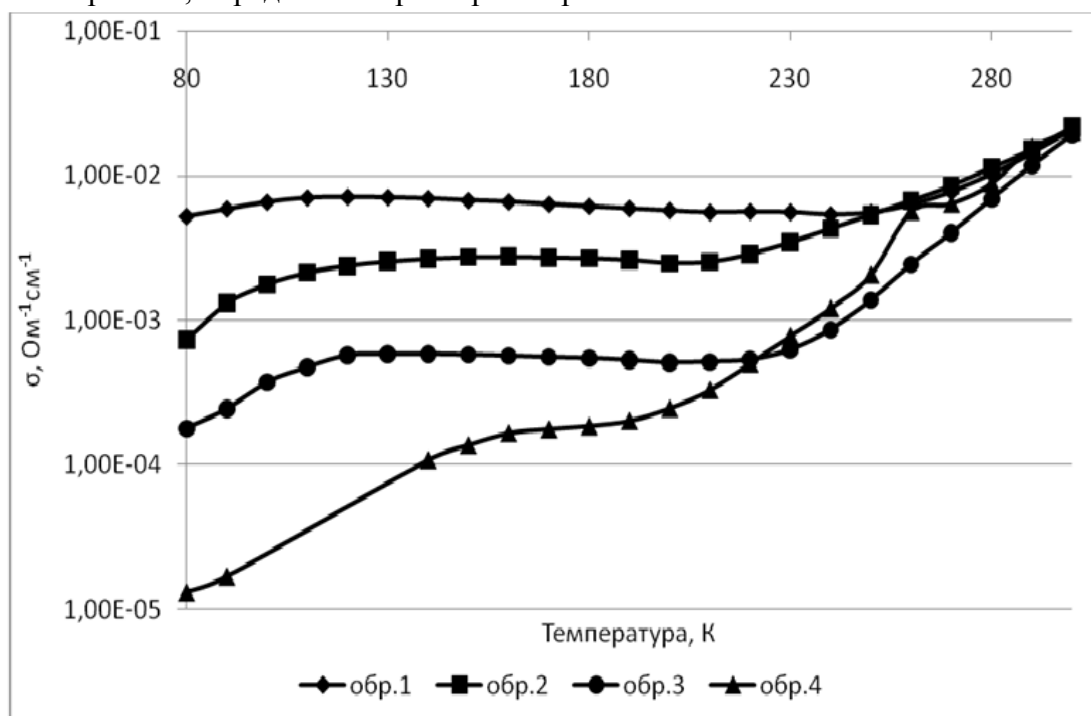


Рисунок 1 – Зависимость удельной электрической проводимости германия от температуры

Из приведенных данных следует, что в интервале температуры от ~ 100 до ~ 200 К наблюдается область истощения примесей, характеризующаяся постоянством электрических свойств. Данная область отвечает равенству концентраций носителей заряда и примесей.

На рисунке 2 приведены графики зависимости удельной электрической проводимости от среднего размера кристаллитов в поликристаллических образцах германия при температуре 200К.

Установлено, что удельная электрическая проводимость оптического германия увеличивается от $3,5 \times 10^{-2}$ до $7,5 \times 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ при возрастании размера кристаллитов от 3,5 до 8,0 мм, что связано с уменьшением подвижности носителей заряда, вызванном их рассеянием на структурных несовершенствах, которыми являются границы раздела. Очевидно, что с возрастанием размера зерен уменьшается удельная поверхность их границ – фактора рассеяния носителей, т.е. чем больше размер зерен, тем выше удельная электрическая проводимость, так как меньшее количество рассеивающих границ.

Противоположную картину наблюдали при исследовании кристаллов ОЧГ, их удельная электропроводность уменьшалась от $6,3 \times 10^{-3}$ до $0,5 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ в интервале среднего размера кристаллитов от 0,5 мм до 10 мм. При переходе к

монокристаллическому строению для одного и того же материала σ снижается до $0,1 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

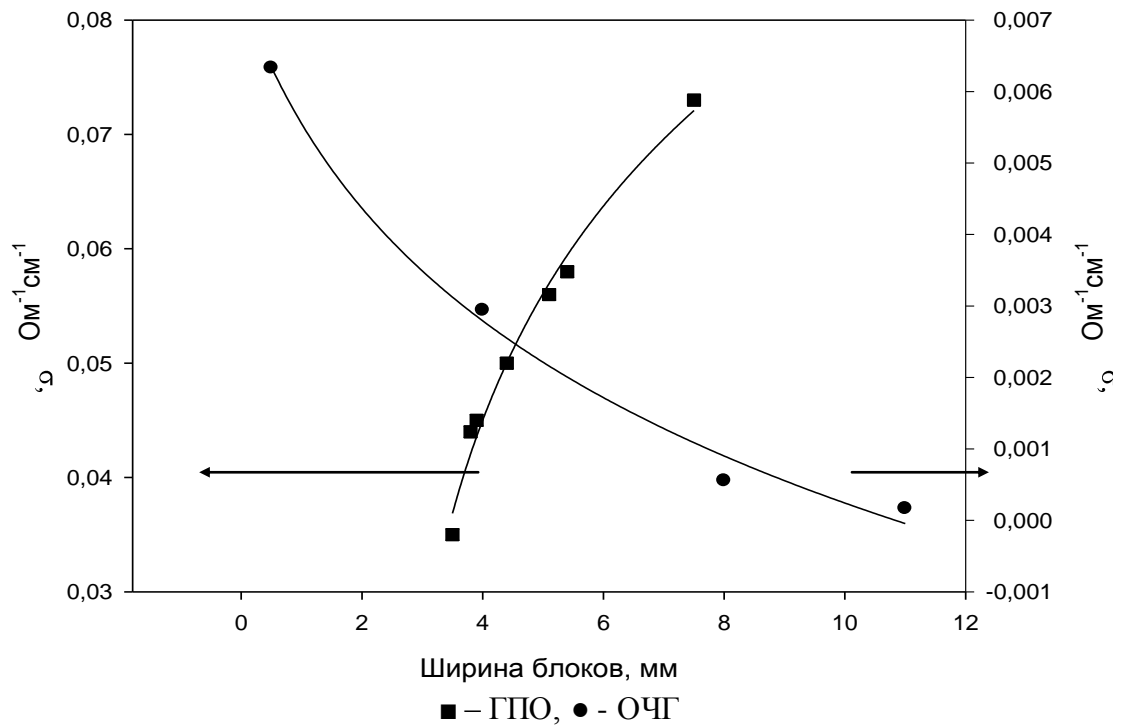


Рисунок 2 – Зависимость удельной электрической проводимости от размера зерен

При построение графиков в логарифмической шкале (рисунок 3) видно, что при уменьшении размера зерен, не зависимо от чистоты материала, проводимость стремится к некоторому уровню, который определяется энергией поверхностных состояний кристаллов на границах разделов и характеризует аморфную структуру.

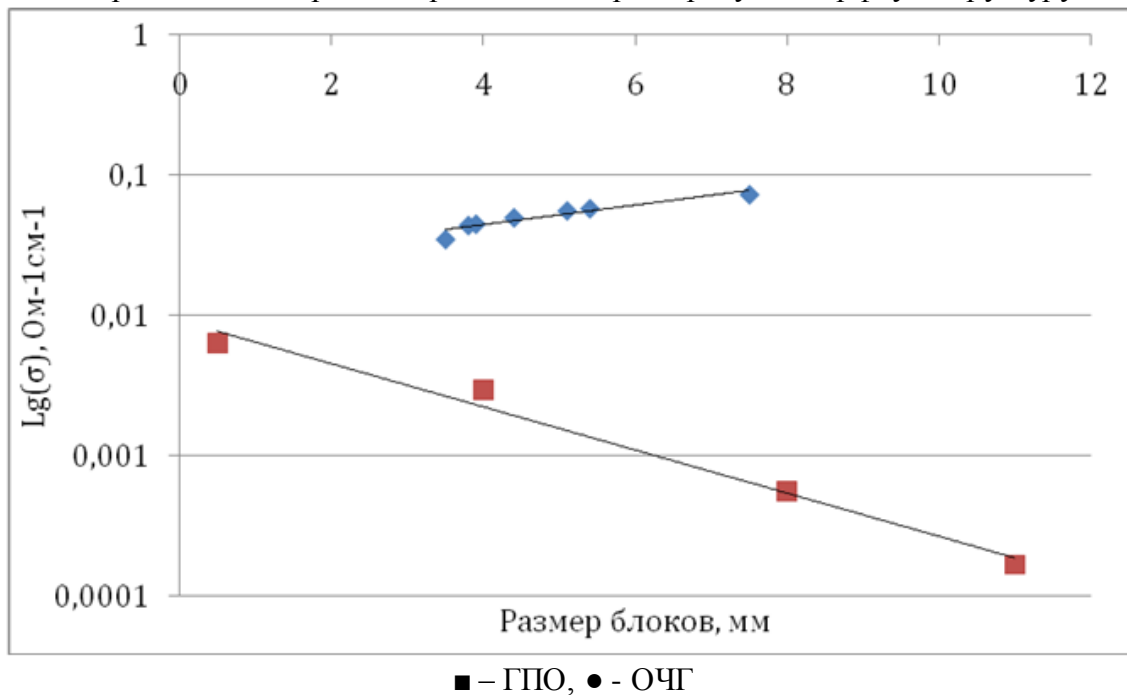


Рисунок 3 - Зависимость удельной электрической проводимости от размера зерен

Выявленные закономерности объясняются наличием в полупроводниках поверхностных электронных состояний, обусловленных обрывом кристаллической решетки и нарушением периодичности потенциала. В 1932 году Тамм, рассматривая

простейшую одномерную модель полубесконечного кристалла как последовательность потенциальных барьеров, ограниченную потенциальной «стенкой», пришёл к выводу о возможности существования поверхностных состояний (ПС), концентрация которых на идеальной поверхности должна быть равна поверхностной концентрации атомов в кристалле, то есть $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Позднее экспериментально была установлена концентрация ПС в германии, которая составила 10^{11} см^{-2} . Соответственно этому, при концентрации свободных носителей заряда в оптическом Ge $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ нейтрализация поверхностного заряда происходит на протяжении нескольких постоянных решетки, составляющем $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ см}$ [3]. Совершенно иначе дело обстоит с ОЧГ, где концентрации носителей и ПС соизмеримы и, по этой причине, область поверхностного потенциала проникает глубоко в объем кристалла. При этом рассеянием носителей заряда на границах блоков и уменьшением их подвижности, в отличие от оптического германия, можно пренебречь. Такое допущение справедливо, если длина свободного пробега носителей $l_{\text{сп}}$ значительно меньше глубины области пространственного заряда L . В германии $l_{\text{сп}}$ составляет $\sim 10^{-5} \text{ см}$ [3]. Таким образом, условие $L \gg l_{\text{сп}}$ в ОЧГ выполняется, в то время как в оптическом германии L и $l_{\text{сп}}$ соизмеримы и наблюдается зависимость подвижности от строения исследуемого образца.

На основании проведенных исследований можно заключить, что характер зависимости электропроводности германия от размера кристаллитов зависит от содержания в нем примесей. Удельная электрическая проводимость особо чистого германия уменьшается с увеличением среднего размера кристаллитов, что необходимо учитывать при контроле содержания в нем примесей по данным электрических измерений.

Влияние наличия границ зерен на проводимость поликристаллического германия зависит от наличия концентрации примесей в германии. Если концентрация примесей превышает 10^{11} см^{-2} , то доминирует эффект рассеяния носителей зарядов и сопротивление материала повышается при уменьшении размера зерен. Если концентрация примесей ниже 10^{11} см^{-2} , то доминирует эффект генерации носителей заряда за счет доминирующей концентрации поверхностных состояний.