

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИГНАЛОВ
(Э.Д.С.) В СТРУКТУРАХ
 $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ и $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$

Камилов Т.С.¹, Эрнст И.В.¹, Клечковская В.В.², Ивакин Г.И.²,
Холмухамедова В.Х.¹, Ибрагимова Б.В.¹, Тураходжаев С.Ж.¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент,
Узбекистан

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Россия
E-mail: tulkyn@mail.ru, klechvv@ns.crys.ras.ru

Ранее [1] при исследовании электрических и фото-термоэлектрических свойств гетероструктур $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ и $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$, помещённых в вакуумный оптический стеклянный криостат и охлаждаемых в темноте до низких температур (< 100 К), было обнаружено появление постоянных сигналов величиной в несколько милливольт и токов со значением 10^{-11} А (измерения проводились электрометром ЭД-05М). Градиент температуры в рассматриваемых структурах всегда приводил к появлению термо-Э.Д.С. При включении в цепь гетероструктуры внешнего источника питания с полярностью, обратной по отношению к возникающему сигналу, эти сигналы (напряжения или тока) не компенсировались, не компенсировались они и при отсутствии внешних источников напряжения смещения. В [1], описывая физические параметры таких гетероструктур, мы отмечали существенное различие в коэффициентах теплопроводности слоя ВСМ и пористой границы кремния, которое способствует возникновению перепада температур по толщине плёнки ВСМ. В настоящее время нам не удалось найти в литературе объяснения возникновению термо-Э.Д.С. в гетеропереходах, находящихся в описанных выше специфических условиях.

Целью настоящей работы являлся поиск причины возникновения постоянных сигналов (Э.Д.С.) при низких температурах в структурах $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-Mn}_4\text{Si}_7$ и $\text{Mn}_4\text{Si}_7\text{-Si}\langle\text{Mn}\rangle\text{-M}$.

Известно, что в области температур $T = 100 \div 125$ К концентрация носителей тока для собственного кремния $n_i \leq 10^2$ см⁻³. При таких концентрациях полупроводники фактически становятся диэлектриками. Известно помимо этого [2], что компенсированные образцы кремния, легированные примесями, создающими глубокие примесные уровни при

низких температурах в темноте, становятся диэлектриками с удельной электропроводностью более 10^{12} (Ом · см)⁻¹. В нашем случае исследуемая база гетероструктуры $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ также приближается по своим свойствам к диэлектрику. До достижения базой гетероструктуры диэлектрического состояния согласно [3] термо-Э.Д.С. V_A определяется выражением (1)

$$V_A = \frac{1}{2} \frac{b_\mu - 1}{b_\mu + 1} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \Delta T, \quad (1)$$

где: b_μ – отношение подвижностей электронов и дырок; p_1 и p_2 – концентрации дырок в областях, имеющих соответственно температуру T_1 и T_2 ; $\Delta T = T_2 - T_1$.

Так как p_1 и p_2 малы или могут быть равны между собой, то не стоило бы ожидать появления термо-Э.Д.С.

Однако в наших опытах термо-Э.Д.С. наблюдалась и на концах гетероструктуры достигала величины в несколько милливольт.

Отмеченное несоответствие побудило нас обратиться к материалам исследований фундаментальных физических явлений, описываемых в [4,5].

Причинно-следственные связи между изменением температуры и получением термоэлектричества в активных средах удобно описываются в виде цепочки:

$$\Delta T \rightarrow \text{термоэлектрическая активная среда} \rightarrow Q(U, I), \quad (2)$$

где ΔT – градиент температуры, Q , U , I – появляющиеся в образце в результате разности температур электрические заряды, напряжения или токи. В [4,5] был описан оригинальный опыт Вольта, который устанавливает наличие контактной разности потенциалов U_k между медным и цинковым дисками, разделёнными диэлектриком. Не вдаваясь в подробности описания этого опыта, заметим, что зарегистрированный эффект мог иметь термоэлектрическую природу, поскольку соединительный провод между дисками мог быть нагрет рукой оператора. В [5] выполнено несколько изменённое воспроизведение опыта Вольта: диски Cu/Zn , разделённые плёнкой из полистирола, соединялись перемычкой из медной фольги, причём, как при наличии перемычки, так и после её снятия, результирующее напряжение на дисках отсутствовало. Однако при нагреве медной перемычки в районе контакта с дисками Cu/Zn возникало термоэлектрическое напряжение $U_{\text{т}}$ на уровне милливольт, обусловленное, как предположили авторы [5], возникающим перепадом температур между дисками Cu/Zn . Приведены некоторые подсчёты: электрические заряды, перенесённые на диски, $Q = CU$ составляли $Q \sim \pm 3,6 \cdot 10^{-15}$ Кл (знак плюс для Cu , минус для Zn) при исходной ёмкости

дисков $C_0 \sim 240$ пФ. При разведении дисков с ростом расстояния результирующее напряжение U на дисках возрастало из-за уменьшения ёмкости конденсатора C [5].

Рассмотрим возможность возникновения подобного процесса в изучаемых нами гетероструктурах $Mn_4Si_7-Si<Mn>-Mn_4Si_7$ и $Mn_4Si_7-Si<Mn>-M$, параметры которых описаны в [1]. Согласно [1] в темноте при температурах $T = 100 \div 125$ К проводимость ВСМ увеличивается почти в два раза, а дифференциальная термо-Э.Д.С. падает и имеет $\alpha \cong 75$ мкВ/К; коэффициент теплопроводности ВСМ $k \cong 4 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см град) [6], а для пористой границы раздела ВСМ с кремнием $k \cong 1,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см.град). Было отмечено, что значительная разница в величинах коэффициентов теплопроводности на пористой границе раздела ВСМ с кремнием и в области, где существует перепад температуры на толщине плёнки ВСМ может, вызывать возникновение термо-Э.Д.С.

Теперь рассмотрим процессы, происходящие в базовой области гетероструктуры при охлаждении её хладопроводом. При понижении температуры в темноте (до установившегося значения температуры 90 – 100 К на хладопроводе) протекающий через структуру темновой ток уменьшался до 10^{-11} А, далее это значение тока практически не менялось даже тогда, когда из цепи был исключён источник питания, т.е. гетероструктура напрямую была подключена к электрометру [1]. В режиме измерения тока электрометр показывал величину порядка 10^{-11} А, в режиме измерения напряжения показывал напряжение более 5 мВ. Очевидно, что эти явления вызваны градиентом температуры, вследствие чего появлялось термоэлектрическое напряжение U_{τ} .

Проиллюстрируем полученный эффект с помощью кривой тока $I = f(T)$, приведённой на рис. 1.

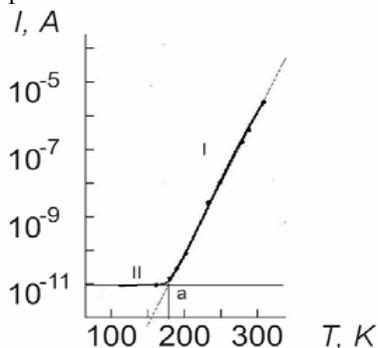


Рис. 1. Температурная зависимость тока $I = f(T)$ в гетероструктуре $Mn_4Si_7-Si<Mn>-Mn_4Si_7$ (снята при охлаждении в темноте) при постоянном

приложенном напряжении $U = 80$ В.

На кривой $I = f(T)$ можно выделить два участка: участок I соответствует полупроводниковому состоянию базовой области $Si<Mn>$, участок II – диэлектрическому. Если характер участка I можно объяснить тем известным фактом, что сопротивление полупроводника уменьшается с увеличением температуры, то характеру участка II, на котором ток I остается практически постоянным с изменением температуры, можно дать несколько объяснений. Таким образом, координаты точки (а) на рис.1, определяют условия, при которых происходит изменение проводящих свойств базовой области гетероструктуры. Именно эта точка (а) в опыте [5] соответствует новому положению дисков после их разведения и установлению нового режима равновесия при условии $Q = const$.

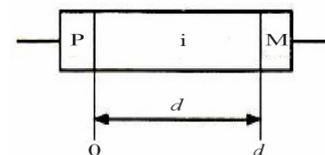


Рис. 2. Представление гетероструктуры $Mn_4Si_7-Si<Mn>-M$ как конденсатора в темноте (i-высокоомная область).

Если это так, то можно оценить ёмкость конденсатора C_1 между обкладками P и M (рис. 2): пусть количество электричества Q , проходящего в одну секунду через поперечное сечение гетероструктуры равно $Q = It = 10^{-11}$ Кл, где I – ток участка II (рис.1), а t – время протекания тока. Тогда при $U \geq 5$ мВ получаем $C_1 = 2 \cdot 10^3$ пФ. Однако расчётная ёмкость гетероструктуры при геометрических размерах (указанных в [1]) с длиной базовой области d (находящейся в диэлектрическом состоянии) равна $2 \cdot 10^{-3}$ пФ. Значительное расхождение результатов при оценке ёмкостей, очевидно, обусловлено тем, что эквивалентная схема гетероструктуры в данном эксперименте оказалась значительно сложнее расчётной. Так хладопровод, входящий в цепь гетероструктуры, и прижимной медный контакт M образуют дополнительный конденсатор C_2 , полость которого заполнена слюдяной прокладкой толщиной 0,1 мм. Конденсатор C_2 включён параллельно ёмкости гетероструктуры при измерениях напряжения или тока. Расчёт геометрической ёмкости прижима C_2 , вычисленной по формуле $C_2 = \epsilon \epsilon_0 S/d$, где $\epsilon = 8$ есть диэлектрическая постоянная слюды, $S \approx 1$ см² – площадь медного прижима, показал, что она равна ~ 71 пФ.

Полученные нами результаты по-прежнему не дают однозначного

ответа и вызывают ряд затруднений при их интерпретации. Тем не менее, можно предложить, по крайней мере, два объяснения характеру участка II (рис.1):

- 1) полупроводник базовой области Si<Mn> при температуре ниже ~ 170 К превращается в диэлектрик и протекающий через него ток смещения порядка 10^{-11} А может быть вызван контактной разностью потенциалов;
- 2) наблюдаемый ток порядка 10^{-11} А может быть обусловлен и действием дополнительного конденсатора C_2 , зарядившегося при работе герероструктуры на участке II, с постоянной времени $\tau_2 = R_{вх} \cdot C_2 = 7 \cdot 10^3$ сек, где $R_{вх} = 10^{14}$ Ом – входное сопротивление электрометра (с учетом того, что при измерениях конденсаторы C_1 и C_2 оказываются включёнными параллельно).

ЛИТЕРАТУРА

1. Камиллов Т.С., Ключевская В.В. и др. Доклады XIII Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». – СПб: 2013, с. 374 – 379.
2. Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.М., Куликов Г.С. Компенсированный кремний. Изд-во «Наука» Л., 1972.- 124 с.
3. Анатычук Л.И., Булат Л.П. Полупроводники в экстремальных температурных условиях. – СПб.: „Наука”, 2001. – 224 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество 1983 г.
5. Коржуев М.А., Нихезина И.Ю. Доклады XII Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». СПб. 2010, с. 396 – 401.