

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА КРЕМНИЯ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ В ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ

Глазов В. М., Кольцов В. Б., Курбатов В. А.

В настоящее время кремний является основным материалом электронной техники, широко применяющимся для производства полупроводниковых приборов различных технических назначений. В связи с этим возникает повышенный интерес к изучению его физико-химических свойств как в твердом, так и в жидком состояниях, к способам управления этими свойствами с целью получения материала определенной степени структурного совершенства и заданных свойств.

Как известно, кремний в различных структурных состояниях (кристаллическом и аморфном) получают из расплава. Однако электрофизические свойства кремниевого расплава изучены крайне недостаточно из-за его высокой химической активности при высоких температурах. Поэтому для решения ряда практических задач, и прежде всего для решения задачи получения совершенных монокристаллов и пленок, представляется весьма актуальным экспериментальное исследование электрофизических свойств данного вещества в твердом и жидком состояниях в области фазового перехода кристалл—расплав.

Анализ температурной зависимости электропроводности позволяет сделать вывод о том, что кремний плавится по типу полупроводник—металл [1-3]. Однако до настоящего времени отсутствовали данные по исследованию температурной зависимости постоянной Холла кремния вблизи фазового перехода кристалл—расплав в твердой и жидкой фазах. С целью получения надежной экспериментальной информации об изменении концентрации носителей заряда при плавлении кремния в данной работе нами проведено комплексное исследование указанного свойства в твердой и жидкой фазах при высоких температурах в рамках единого эксперимента с использованием прецизионной методики измерения и высокочувствительной аппаратуры [4].

Применяемая нами методика измерения эффекта Холла является модификацией хорошо известного метода переменного тока и переменного магнитного поля [5]. При оценке погрешности измерения мы учитывали точность измерения температуры, холловского напряжения, электрического тока, магнитного поля и толщины щели измерительной ячейки. Для исследования эффекта Холла мы применяли измерительные ячейки, изготовленные методом шликерного литья из керамики на основе Al_2O_3 по методике [4]. При этом погрешность измерения константы Холла составляла 6 % [4]. В связи с тем что исследование данных электрофизических параметров проводилось контактным методом, возникла необходимость в подборе контактного материала, который в процессе измерения не вступал бы в реакцию с исследуемым веществом и в то же время образовывал с ним омический контакт. В качестве такого высокотемпературного материала был выбран дисилицид молибдена, область температурной устойчивости которого достигает 2000 К [6]. К числу достоинств данного материала следует отнести и тот факт, что термоэдс $MoSi_2$ выше 800 К практически не зависит от температуры и близка к величине -3 мкВ/К.

Перед началом эксперимента проводилась подготовка ячеек. Гнезда 2—5 измерительной ячейки I (рис. 1) заполнялись приготовленной пастой (смесь бакелитового лака и порошка $MoSi_2$), куда одновременно помещались вольфрам-ренийевые термодпары и токоподводы. Предварительно для исключения попадания контактного материала в рабочую щель ячейки туда помещалась тщательно подогнанная по размеру полости шлифования алундовая пластинка. Сформированные таким образом контакты отжигались в течение суток в инертной среде при температуре 800 К. При этом периодически проводилась откачка из объема печи. Последняя фаза отжига проводилась при температуре 1800 К.

в течение 5—6 ч. По окончании отжига алундовая пластинка удалялась из рабочего канала ячейки и заменялась на кремниевую, которая плотно впрессовывалась в рабочий канал ячейки. Приготовленная таким образом к работе измерительная ячейка помещалась в специальную высокотемпературную печь для исследования эффекта Холла [7], а затем после плавления и стабилизации температуры проводились соответствующие измерения.

На рис. 2, а представлены результаты исследований температурной зависимости эффекта Холла кремния в твердом и жидком состояниях. Из рис. 2, а

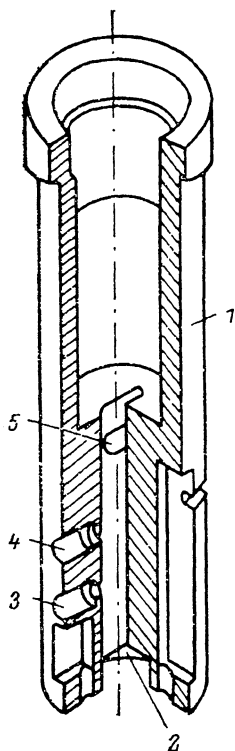


Рис. 1. Ячейка для исследования электрофизических свойств кремния в твердой и жидкой фазах.

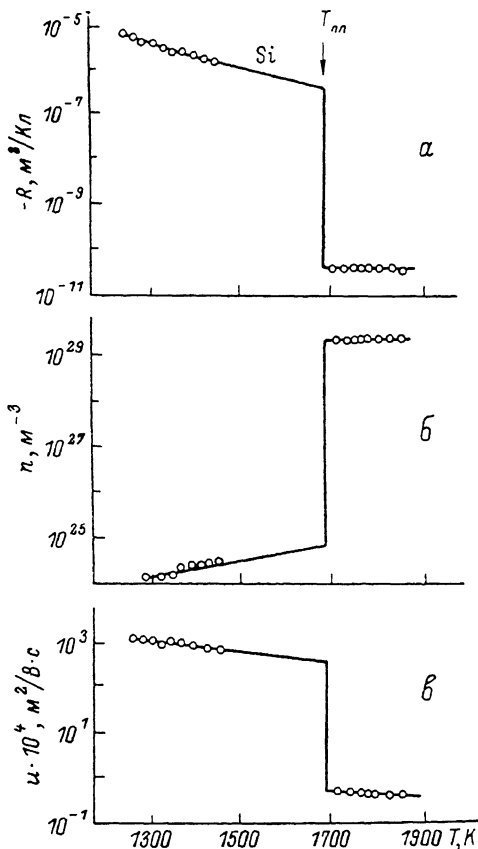


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента Холла (а), концентрации носителей заряда (б) и подвижности носителей заряда (в).

видно, что постоянная Холла в твердом состоянии отрицательна и монотонно уменьшается с ростом температуры по абсолютной величине. В точке плавления наблюдается скачок константы Холла на 4 порядка, направленный в сторону ее уменьшения (по абсолютной величине). В жидкой же фазе знак постоянной Холла остается отрицательным, а ее величина близка к значениям, характерным для жидких металлов.

Отметим, что полученные результаты измерений эффекта Холла кремния в твердом и жидком состояниях качественно согласуются с данными по измерению температурной зависимости электропроводности и термоэдс [8] и отражают общую тенденцию изменения характера межатомного взаимодействия при плавлении вещества.

При проведении измерений эффекта Холла кремния от температуры 1514 К и вплоть до точки плавления имел место большой разброс экспериментальных результатов, существенно превышающий ошибку измерения, поэтому для получения численного значения R_H в твердой фазе мы проэкстраполировали

полученную температурную зависимость коэффициента Холла на температуру плавления. Следует отметить, что данный факт имел место только при исследовании эффекта Холла и никак не проявил себя при исследовании электропроводности и термоэдс [8].

В температурном интервале 1333—1514 К на основании анализа температурной зависимости коэффициента Холла проведена оценка ширины запрещенной зоны, при этом $\Delta E_{гн}$ оказалась равной 0.76 эВ. Полученное значение хорошо согласуется с величиной $\Delta E_{\sigma} = 0.71$ эВ, полученной в работе [1] из температурной зависимости электропроводности. В этом же температурном интервале с привлечением данных по термоэдс [8] мы рассчитали соотношение подвижностей электронов и «дырок» b по методике [9], которое оказалось равным 1.77. Считая, что вблизи точки плавления кремний является собственным полупроводником со слабым рассеянием носителей заряда

$$kT > h/\tau \quad (1)$$

(где k — постоянная Больцмана, T — температура в К, $h = 2\pi\hbar$ — постоянная Планка, τ — время релаксации) и что рассеяние происходит в основном на тепловых колебаниях решетки, мы провели оценку концентрации носителей заряда по соотношению

$$R_{HS} = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{n_i e} \frac{|b-1|}{|b+1|}. \quad (2)$$

Здесь R_{HS} — постоянная Холла, e — заряд электрона, n_i — концентрация носителей заряда, значение которой оказалось равным $2.9 \cdot 10^{24}$ м⁻³. Эта величина на порядок меньше предельной концентрации носителей заряда при данной температуре, рассчитанной по формуле Шифрина [10], что позволяет сделать вывод о том, что в твердом состоянии вблизи точки плавления кремний является невырожденным полупроводником. К аналогичному выводу можно прийти, если оценить положение уровня Ферми из данных по исследованию термоэдс [8].

В жидком состоянии экспериментальное значение константы Холла вблизи точки плавления составляет $-3.3 \cdot 10^{-11}$ м³/Кл, что близко к значению коэффициента Холла, рассчитанному по теории свободных электронов при условии, что при плавлении кремния отделяется четыре валентных электрона на атом ($-3.1 \cdot 10^{-11}$ м³/Кл). Отметим, что в пределах ошибки эксперимента значение коэффициента Холла в расплаве кремния остается практически постоянным и не зависит от температуры.

Расчет концентрации носителей заряда и их подвижности в жидкой фазе кремния мы проводили по простым соотношениям теории свободных электронов:

$$R_H = 1/n_e, \quad (3)$$

$$\mu_H = R_H \varepsilon. \quad (4)$$

Температурная зависимость концентрации и подвижности носителей зарядов в кремнии представлена на рис. 2, б, в. Как видно из этого рисунка, при плавлении наблюдается резкое увеличение концентрации носителей заряда до значений, свойственных концентрации носителей заряда в металлах (см. таблицу). Подвижность же носителей заряда при переходе кремния из твердого состояния в жидкое скачкообразно уменьшается и также достигает значений, свойственных металлическому состоянию.

Изменение электрофизических свойств кремния в процессе фазового перехода кристалл—расплав

Решество	$R_{HS} \cdot 10^6$, м ³ /Кл	$R_L \cdot 10^{11}$, м ³ /Кл	$\frac{R_{HS}}{R_L} \cdot 10^{-1}$	$n_S \cdot 10^{-21}$, м ⁻³	$n_L \cdot 10^{-20}$, м ⁻³	$\frac{n_L}{n_S} \cdot 10^{-4}$	$u_S \cdot 10^4$, м ² /В · с	$u_L \cdot 10^4$, м ² /В · с	$\frac{u_S}{u_L}$
Si	-0.7	-3.3	2	2.9	2	6.9	420	0.4	1050

Полученные экспериментальные результаты по исследованию температурной зависимости константы Холла кремния, а также концентрации носителей заряда и их подвижности в кремнии со всей очевидностью подтверждают вывод Регеля [1] о том, что кремний плавится по типу полупроводник—металл.

Л и т е р а т у р а

- [1] Мокровский Н. П., Регель А. Р. Электропроводность жидкого кремния. — ЖТФ, 1953, т. 23, в. 5, с. 779—782.
- [2] Глазов В. М., Чижевская С. Н., Глаголева Н. Н. Жидкие полупроводники. М., 1967. 244 с.
- [3] Регель А. Р., Глазов В. М. Физические свойства электронных расплавов. М., 1980. 296 с.
- [4] Казанджан Б. И., Матвеев В. М., Селин Ю. И. Методика исследования эффекта Холла в жидких полупроводниках. — Зав. лаб., 1979, т. 45, в. 5, с. 433—435.
- [5] Жузе В. П., Николаев С. Н. Метод измерения эффекта Холла в полупроводниках. — ЖТФ, 1953, т. 23, в. 5, с. 913—923.
- [6] Самсонов Г. В., Дворниа Л. А., Рудь В. М. Сплициды. М., 1979. 271 с.
- [7] Кольцов В. Б., Курбатов В. А., Селин Ю. И., Умаров А. М. Универсальный нагреватель для исследований электрофизических параметров металлов и полупроводников. — Зав. лаб., 1986, т. 52, в. 4, с. 52—53.
- [8] Глазов В. М., Кольцов В. Б., Курбатов В. А. Исследование температурной зависимости электропроводности и термоэдс кремния вблизи точки плавления в твердом и жидком состоянии. — ФТП, 1986, т. 20, в. 12, с. 2159—2162.
- [9] Буш Г., Винклер У. Определение характеристических параметров полупроводников. М., 1959. 139 с.
- [10] Шифрин К. С. Условия, при которых наблюдается заметное вырождение электронного газа. — ЖТФ, 1944, т. 14, в. 1, с. 40—81.

Московский институт
электронной техники

Получено 12.06.1987
Принято к печати 21.07.1987

ФТП, том 22, вып. 2, 1988

ТУННЕЛЬНО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ТОКИ В $p-n$ -ПЕРЕХОДАХ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПРИ $T > 80$ К

Баженов Н. Л., Гасанов С. И., Иванов-Омский В. И.,
Мынбаев К. Д., Огородников В. К., Процьк В. И.

В настоящее время широко исследуются фотодиодные структуры на основе твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с целью создания на их основе приемников излучения [1]. Важным параметром, который характеризует механизмы протекания тока через $p-n$ -переход, является удельное дифференциальное сопротивление диода при нулевом смещении Z . Показано, что в температурном диапазоне $77 \div 290$ К величина Z определяется диффузионным и генерационно-рекомбинационными токами [1], а при более низких температурах — туннелированием зона—зона и через локальные центры [2]. В работах [3, 4] сделаны расчеты, указывающие на то, что возможным механизмом, ограничивающим Z в $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0.2 < x < 0.3$) при $T > 80$ К, может являться термическая генерация носителей заряда на локальный центр, сопровождающаяся туннелированием в соответствующую зону.

В настоящей работе сообщается об экспериментальном исследовании температурной зависимости Z в диапазоне $77 < T < 290$ К.

Исходным материалом для создания $p-n$ -структур служили слои $Cd_{0.34}Hg_{0.66}Te$, полученные методом жидкостной эпитаксии из теллуристого раствора-расплава [5]. Эти слои имели дырочный тип проводимости. Концентрация и подвижность носителей составляли $\sim 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и $300 \div 400$ см²/В·с соответственно; $p-n$ -переходы создавались имплантацией алюминия.