

05;08;12

©1994

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНОГО КРИСТАЛЛА КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 4H

*А.Ю.Максимов, А.А.Мальцев, Н.К.Юшин,
Г.О.Андреанов*

Из-за своих уникальных физических свойств кристаллы карбида кремния (SiC) нашли широкое применение в различных устройствах микроэлектроники [1-3]. Монокристаллы карбида кремния получают из газовой фазы методом спонтанной кристаллизации (т.н. метод Лели [4]), при котором образуются пластинки площадью не более 1 см^2 , среди которых кристаллы политипа 4H встречаются очень редко (менее 1%), и методом сублимации на затравке (т.н. метод ЛЭТИ [5]), при котором выращиваются объемные кристаллы с размерами до нескольких см^3 , причем коммерчески доступны только кристаллы политипа 6H [6]. Нами были выращены кристаллы политипа 4H, которые выгодно отличаются большими, чем у политипа 6H, шириной запрещенной зоны (3.2 эВ) и подвижностью электронов ($\mu = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), что делает их предпочтительным для изготовления полевых транзисторов [3].

Для анализа механических и прочностных характеристик приборов необходимы данные по упругим свойствам, однако в литературе [7] имеются сведения только о свойствах кристалла политипа 4H, измеренных методом резонансных колебаний пластин. Причем из-за высокой проводимости такие измерения проводились только при температурах ниже 77 К [7]. В то же время для массового производства реальных полупроводниковых приборов из карбида кремния пригодны лишь объемные кристаллы с диаметром более 25 мм. Поэтому становится очевидной необходимость проведения измерений упругих свойств объемного кристалла. Изучение упругих свойств представляет интерес и с точки зрения фундаментальных проблем физики твердого тела, так как карбид кремния отличается высокой теплопроводностью ($4.9 \text{ Вт}/\text{см} \cdot \text{К}$), большой твердостью (твердость по Моосу = 9.5), малой плотностью ($\rho = 3.17 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$), низким тепловым расширением ($\alpha = 4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и высокой температурой Дебая ($\theta > 1200 \text{ К}$), что свидетельствует об

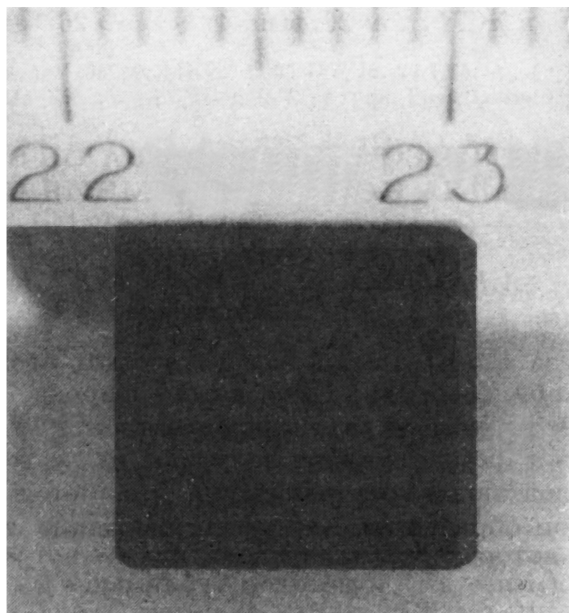


Рис. 1. Образец для акустических измерений, вырезанный из объемной булы кристалла SiC политипа 4H.

особенностях фоновых свойств этого кристалла. Кроме того, представляется интересным сравнить значения упругих модулей измеренных разными методами.

Целью настоящей работы является ультразвуковое измерение значений акустических свойств объемного кристалла карбида кремния политипа 4H.

Измерения проводились на образцах с размерами около 1 см^3 — каждый, вырезанных из булы диаметром 25 мм. Булы были выращены методом транспортной сублимации при температуре 2300°C с пониженным давлением аргона ($3-10 \text{ mbar}$) в печи с индукционным нагревом. Кристаллы имели *n*-тип проводимости при концентрации носителей $3 \cdot 10^{18} / \text{см}^3$. Плотность пор не превышала $10^2 / \text{см}^2$. Политип кристаллов идентифицировался как 4H методом рентгеновской дифрактометрии и по фотолюминесценции при ультрафиолетовом облучении пластин, вырезанных из выращенного кристалла, и в которые была проведена диффузия бора. Образцы для акустических измерений имели форму параллелепипеда с плоскопараллельными гранями, ориентированными по направлению $[0001]$ и перпендикулярному ему. На рис. 1 приведена фотография объемного кристалла политипа 4H, на котором были выполнены измерения.

Значения скоростей упругих волн в кристалле карбида кремния SiC политипа 4H

Тип волны	Направление распространения, q	Поляризация	Скорость 10^3 м/с
Продольная, V_L	[0001]	[0001]	12.8
Поперечная, V_S	[0001]	любая	8.4
Продольная, V_I	\perp [0001]	\perp [0001]	11.0

Упругие волны возбуждались и регистрировались с помощью пьезопреобразователей из ниобата лития соответствующих срезов и толщин. Измерения скоростей упругих волн проводились методом наложения импульсов. Точность определения абсолютного значения скорости составляла 3%, а точность относительных измерений — 0.001%. Затухание упругих волн определялось путем сравнения с экспонентой, точность измерения затухания не превышала 5%. Измерения, проведенные в диапазоне температур 78–300 К, не выявили каких-либо изменений скоростей упругих волн и затухания в пределах погрешностей измерений.

Эксперименты показали, что вдоль оси [0001] наблюдается довольно регулярная последовательность ультразвуковых эхо-импульсов, экспоненциально спадающих по амплитуде для продольных волн и неэкспоненциально — для поперечных. Для направления, перпендикулярного гексагональной оси, удалось добиться распространения продольных волн, но не удалось — поперечных. Данное обстоятельство, по-видимому, связано с рассеянием звука на имеющихся в кристалле протяженных дефектах, ориентированных параллельно гексагональной оси, [0001].

Значения скоростей упругих волн представлены в таблице. Как известно, скорость продольной упругой волны вдоль оси [0001] определяется упругим модулем C_{33} , а поперечной волны в этом направлении модулем C_{55} , тогда как продольная волна вдоль направления, перпендикулярного гексагональной оси, связана с модулем C_{11} . Сравнение со значением скорости продольной волны вдоль [0001] $V_L = 13.7310^3$ м/с, полученной при 20 К из резонансных колебаний в [7], показывает различие упругих модулей кристаллов, полученных разными методами, что свидетельствует о наличии частотной дисперсии упругих свойств и/или о различном структурном совершенстве измеренных кристаллов. Отметим, что длина волны звука для самых высоких частот, использованных в данном эксперименте, не может достигать величин, соизмеримых с размером имеющихся

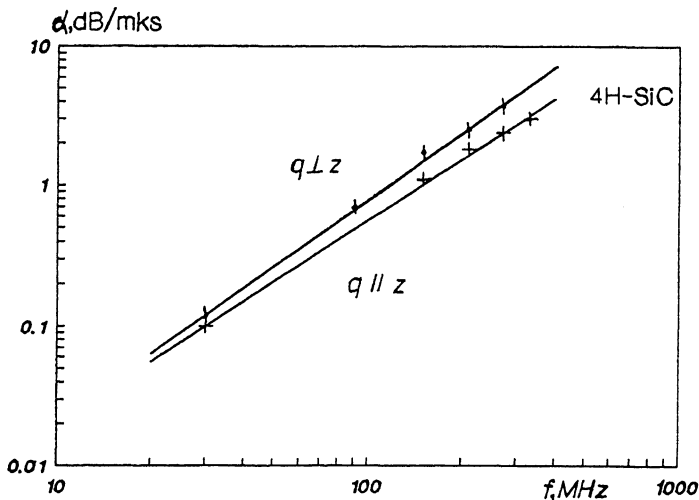


Рис. 2. Частотная зависимость затухания α продольных упругих волн, распространяющихся вдоль гексагональной оси ($q \parallel z$) и вдоль направления, перпендикулярного этой оси ($q \perp z$). Температура комнатная.

в кристалле пор. Простые оценки, сделанные из измеренной величины скорости, дают концентрацию пор как 0.0008%.

Представляется интересным обсудить данные по акустическим потерям (рис. 2). Акустическое затухание α , измеренное для продольных упругих волн в диапазоне частот 30–330 МГц, оказалось зависящим от частоты ν по закону

$$\alpha = \nu^n$$

при $n = 1.45 \pm 0.05$ для продольной волны вдоль гексагональной оси ($q \parallel z$) и $n = 1.60 \pm 0.05$ для продольной волны вдоль направления, перпендикулярного этой оси ($q \perp z$). Отметим, что для контурных и толщинных колебаний частоты 0.1–30 МГц пластин SiC политипа 4H приводились величины добротности $Q = 20000-100000$ [7], что в целом согласуется с нашими результатами. Известно, что механизм Ахиезера акустического затухания [8], который должен в принципе соответствовать условиям нашего эксперимента, предсказывает квадратичную зависимость затухания α от частоты. В то время как рассеяние на макроскопических дефектах привело бы к частотной зависимости типа $\alpha = \nu^4$ [8]. Следует заметить, что продольная волна вдоль [0001] является пьезоактивной, как и поперечная вдоль направления, перпендикулярного гексагональной оси, хотя коэффициент электромеханической связи в карбиде кремния

не превышает 0.1% [7], тем не менее электрон-фоонное взаимодействие может внести вклад в суммарные акустические потери в этом кристалле. Поскольку концентрация носителей в кристалле при понижении температуры меняется существенным образом, то отсутствие температурных изменений акустических характеристик при температуре 78–300 К свидетельствует о малой величине пьезоэлектрического электрон-фоонного взаимодействия.

Таким образом, нами впервые исследованы акустические свойства объемного кристалла карбида кремния политипа 4H и проведено обсуждение полученных результатов.

В заключение авторы благодарят В.Е.Челнокова за внимание к работе, Е.А.Тараканова за проведение температурных измерений, а И.П.Никитину за рентгенодифракционные данные.

Работа частично поддержана US Department of Defense.

Список литературы

- [1] *Trew R.J., Yan J.-B., Mock P.M.* Proc.IEEE. 1991. V. 79. P. 598.
- [2] *Davis R.F., Kelner G., Shur M., Palmour J.W., Edmond J.A.* // Proc. IEEE. 1991. V. 79. P. 677.
- [3] *Аникин М.М., Иванов П.А., Растегаев В.П., Савкина Н.С., Сыркин А.Л., Челноков В.Е.* // ФТП. 1993. Т. 27. В. 1. С. 102–107.
- [4] *Lely J.A.*, // Ber. Deut. Keram. Ges. 1955. V. 32. P. 229.
- [5] *Tairov Yu. M., Tsvetkov V.F.* // J. Cryst. Growth. 1978. V. 43. P. 209.
- [6] CREE Research Inc. NC, USA.
- [7] *Karmann S., Helbig R., Stein R.A.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. P. 3922.
- [8] *Труэлл Р., Элбаум Ч., Чук Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 330 с.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
14 января 1994 г.