

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ЗАТУХАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ

В.В.Лемаков, В.Я.Авдонин, А.В.Петров

Точечные дефекты в кристаллах (примеси, вакансии, внедрения) не могут непосредственно рассеивать гиперзвуковые упругие волны. Это связано с тем, что размеры таких дефектов на несколько порядков меньше, чем длина волны упругих волн (при частоте 1000 мГц длина волны составляет около 10^{-4} см). Точечные дефекты, тем не менее, могут влиять на затухание упругих волн косвенно, через тепловые фононы.

Согласно теории Ахиезера [1] затухание упругих волн, связанное с взаимодействием их с тепловыми фононами, определяется формулой [1–3]:

$$A = \gamma^2 \frac{CT\omega^2 r}{2\rho v^3(1 + \omega^2 r^2)} \quad (1)$$

Здесь γ – константа ангармонизма, T – температура, C – теплоемкость, ρ – плотность, v и ω – скорость и частота упругих волн, r – время релаксации, пропорциональное времени релаксации тепловых фононов τ_{ϕ} , которое определяется из выражения для теплопроводности

$$\kappa = \frac{1}{3} C \bar{v}^2 r_{\phi}$$

Теория Ахиезера построена для случая, когда $\omega r < 1$. Такое соотношение выполняется для многих кристаллов при температурах выше температуры жидкого азота. В этом случае (1) сводится к

$$A = \gamma^2 \frac{CT\omega^2 r}{2\rho v^3} = \gamma^2 \frac{3\kappa T \omega^2 r / r_{\phi}}{2\rho v^3 \bar{v}^2} \quad (2)$$

Таким образом, согласно теории Ахиезера затухание упругих волн в кристаллах пропорционально теплопроводности.

Примеси в кристаллах, вызывая рассеяние тепловых фононов, уменьшают их время релаксации и приводят к снижению теплопроводности. Согласно (2) это должно вызывать уменьшение затухания упругих волн, т. е. в кристалле с примесями затухание должно быть меньше, чем в чистом кристалле.

Для проверки такого интересного вывода, вытекающего из теории Ахиезера, нами были проведены измерения затухания упругих волн с частотами около 1000 мГц в кристаллах кремния с примесью германия.

Известно, что введение примеси германия в кремний приводит к резкому уменьшению теплопроводности [4]. Так в кристаллах кремния с 4 ат.% германия теплопроводность по сравнению с чистым кремнием уменьшается примерно в 10 раз при комнатной температуре и в 30 раз при температуре жидкого азота. Такое сильное уменьшение теплопроводности должно, если справедлива формула (2), приводить к такому же уменьшению затухания упругих волн.

Измерения затухания проводились обычным импульсным методом. Упругие волны возбуждались и регистрировались с помощью пьезопреобразователей из кварца и ниобата лития. Затухание измерялось при распространении упругих волн вдоль направлений $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Различия в затухании для разных направлений оказались несущественными.

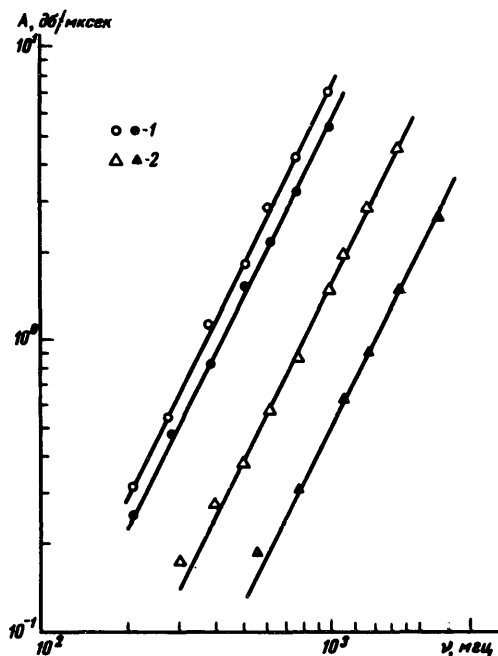


Рис. 1. Частотная зависимость затухания 1 — продольных и 2 — поперечных упругих волн, 300°K: \circ , Δ — чистый кремний, \bullet , \blacktriangle — кремний с 4,4 ат.% германия. Прямые линии проведены в предположении квадратичной зависимости затухания от частоты

Результаты измерений представлены на рисунках 1, 2 и 3.

На рис. 1 показана частотная зависимость затухания упругих волн для чистого кремния и для кремния с примесью германия. В том и другом случае затухание оказывается пропорциональным квадрату частоты, как и должно быть согласно (2). Видно, что примесь германия, действительно приводит к уменьшению затухания.

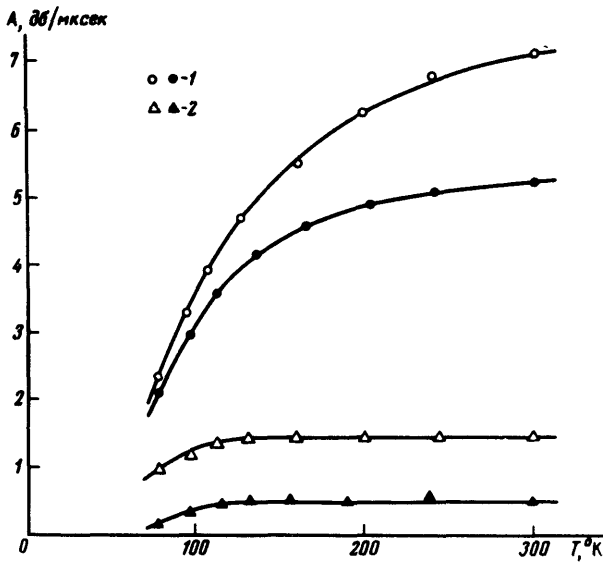
На рис. 2 приведена температурная зависимость затухания, а на рис. 3 показана зависимость относительного уменьшения затухания от концентрации примеси германия.

Из приведенных результатов следует, что при концентрации германия около 4 ат.% затухание поперечных упругих волн уменьшается по сравнению с чистым кремнием в 3 раза при комнатной температуре и в 6 раз при температуре жидкого азота. Для продольных волн также четко наблюдается уменьшение затухания, но оно незначительно: всего около 30% при комнатной температуре и еще меньше при азоте.

Полученные результаты, таким образом, качественно подтверждают вывод теории Ахиезера об уменьшении затухания упругих волн в кристаллах с примесями. Уменьшение затухания оказывается, однако, не столь сильным (особенно для продольных волн), как это должно быть согласно формуле (2) и данным по теплопроводности [4].

Причина количественного расхождения между теорией Ахиезера и полученными нами экспериментальными результатами вероятно заключается в следующем.

Как показывают данные рентгеновской дифракционной топографии¹⁾ при введении в кремний примеси германия происходит частичная сегрегация примеси, т. е. образуются своего рода макродефекты, которые могут непосредственно рассеивать упругие волны. В таком случае в кристаллах кремния с примесью германия увеличение затухания упругих волн из-за рассеяния на макродефектах будет в какой-то мере компенсировать уменьшение затухания связанное с уменьшением теплопроводности кристаллов.



Фиг. 2. Температурная зависимость затухания упругих волн, частота 1000 мц. Обозначения те же, что на рис. 1

Учет этого обстоятельства может привести к совпадению теории Ахиезера с экспериментальными результатами для поперечных упругих волн, что касается продольных волн, то для них расхождение между теорией и экспериментом будет оставаться большим.

Различие в поведении продольных и поперечных упругих волн в кристаллах с примесями, по-видимому, можно объяснить следующим образом.

В работе [3] было показано, что экспериментальные результаты по затуханию упругих волн в чистых кристаллах кремния и германия хорошо описываются формулой типа (1) в том случае, если предположить, что для поперечных волн время релаксации τ равно эффективному времени релаксации тепловых фононов τ_d , а для продольных волн время релаксации в два раза больше.

Было высказано предположение, что это различие связано с разным характером взаимодействия продольных и поперечных упругих волн с тепловыми фононами, как это имеет место для случая $\omega\tau > 1$. Действительно, из законов сохранения энергии и импульса при взаимодействии упругих волн с фононами следует, что поперечные волны могут непосредственно взаимодействовать с высокочастотными тепловыми фононами, а продольные — лишь с тепловыми фононами примерно той же частоты, что и должно приводить к относительно большим временам релаксации для продольных волн.

¹⁾ Авторы благодарны О.Н. Ефимову за сообщение этих данных.

Если предположить, что примесь германия в кремнии рассеивает тепловые фононы по релеевскому закону, то это будет вызывать сильное уменьшение релаксации для высокочастотных фононов и будет слабо сказываться на времени релаксации низкочастотных фононов. Соответственно, время релаксации, а, следовательно, согласно (2) и затухание, сильно уменьшится для поперечных упругих волн, взаимодействующих с высокочастотными тепловыми фононами, а для продольных волн, которые взаимодействуют с низкочастотными фононами, изменение затухания будет небольшим.

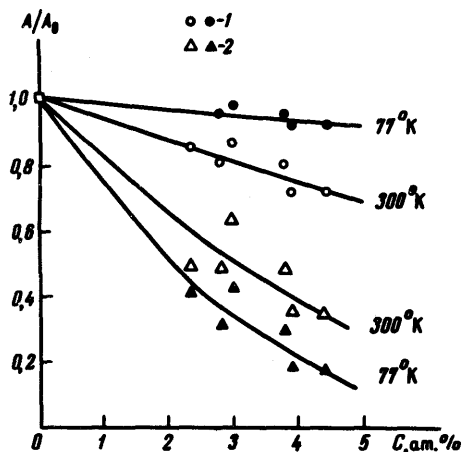


Рис. 3. Зависимость относительного уменьшения затухания упругих волн в кремнии от концентрации примеси германия: 1 — продольные волны, 2 — поперечные волны.

Строгое объяснение полученных результатов нуждается, конечно, в детальном теоретическом анализе.

Авторь признательны В.Б.Ждановой, Д.Б.Сергееву и О.Н.Ефимову за предоставление кристаллов, а Г.А.Смоленскому за обсуждение результатов.

Институт полупроводников
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 октября 1970 г.

Литература

- [1] А.И.Ахиезер. ЖЭТФ, 8, 1318, 1938.
- [2] Т.О. Woodruff, Н. Ehreureich. Phys. Rev., 123, 1553, 1961.
- [3] У.Мэзон. Физическая акустика, М., Изд. Мир, 3Б, 285, 1968.
- [4] Р.С.Ерофеев, Е.К.Иорданишвили, А.В.Петров. ФТТ, 7, 3054, 1965.