

05;08;11;12

Акустическая эмиссия в дислокационном кремнии при токовых и тепловых воздействиях

© А.М. Орлов, А.А. Скворцов, В.А. Фролов

Ульяновский государственный университет

Поступило в Редакцию 3 июля 1998 г.

Исследована акустическая эмиссия (АЭ) в монокристаллах кремния при протекании электрического тока. Обнаружено, что в диапазоне исследованных температур ($T = 300\text{--}450\text{ К}$) в постоянном электрическом поле возбуждаются сигналы акустической эмиссии, интенсивность которых возрастает с увеличением плотности дислокаций. Проведено сравнение АЭ дислокационных и бездислокационных монокристаллов кремния. Предполагается, что акустическая эмиссия в кремнии обусловлена срывом и движением дислокаций под воздействием как постоянного электрического тока, так и термоупругих напряжений. Оценена энергия активации этого процесса $E = 0.53 \pm 0.05\text{ эВ}$ при протекании постоянного тока плотностью $j = 2.8 \cdot 10^5\text{ А/м}^2$.

Как известно, различные внешние воздействия на кристаллы с линейными дефектами сопровождаются возникновением в их объеме звуковых импульсов (акустическая эмиссия), связанных с движением дислокаций, образованием трещин и разрушением материала [1]. Такая ситуация характерна для полупроводниковых кристаллов, работающих при повышенных токовых и тепловых нагрузках [1], например в полупроводниковых приборах. Несмотря на это, акустоэмиссия полупроводников при постоянных внешних воздействиях изучена явно недостаточно. Так, например, практически отсутствуют данные об акустической эмиссии дислокационных полупроводников в стационарных тепловых и электрических полях. Поэтому данная работа посвящена акустической эмиссии, возникающей при токовом и тепловом воздействиях в пластинах дислокационного кремния.

В качестве образцов использовались бездислокационные и дислокационные кремниевые пластины длиной $l = 40$, толщиной $d = 0.35$ и шириной $h = 10\text{ мм}$, легированные фосфором с удельным сопротивле-

нием $\rho = 0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ и ориентацией [111]. Дислокации вводились путем отжига пластин под нагрузкой по трехточечной схеме при температуре 1000°C в течение 10–30 min. Плотность дислокаций составляла 10^3 cm^{-2} .

Акустическая эмиссия возбуждалась пропусканием тока плотностью $j = (1.4\text{--}5.7) \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ и внешним термическим нагревом. Контроль температуры (300–450 К) с точностью $\pm 1 \text{ K}$ осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой, находящейся вблизи пластины. Для уменьшения влияния акустической эмиссии токоподводящих контактов использовалась жидкая In–Ga-эвтектика. Омичность контактов проверялась по вольт-амперным характеристикам.

Сигналы АЭ фиксировались пьезоэлектрическим датчиком, лежащим на поверхности исследуемой пластины. Для улучшения акустического контакта использовалось вакуумное масло VM-6. В роли датчика выступала пьезокерамическая пластина ЦТС-19 толщиной 0.3 mm и диаметром 10 mm, собственные частоты которой ($f_i \geq 4 \text{ MHz}$) находились выше спектрального состава сигнала-отклика. Электрический отклик с датчика $U(t)$ подавался на запоминающий осциллограф С9-8, состыкованный с ЭВМ для записи и накопления информации. Спектральный состав сигнала-отклика $U(\omega)$ получался с использованием стандартного алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Кремниевая пластина с датчиком помещалась в электропечь и прогревалась вместе с ней. Стационарное значение температуры в печи устанавливалось через 3.5–4 h после включения нагрева. По получаемым в процессе нагрева спектрам оценивали энергию колебаний W . В нашем случае $W \sim \sum_n U_n^2$, где U_n — амплитуды гармоник экспериментального спектра. Это следует из прямой пропорциональной зависимости между $U(t)$ и колебательной скоростью $v(t)$ [2]. Было установлено, что при $j = 0$ электрический отклик после установления стационарной температуры монотонно уменьшается и через 1.5–2 h достигает некоторого фонового значения. Это противоречит данным работы [3], авторы которой впервые обнаружили звуковой отклик при тепловом возмущении. Полученные нами результаты показывают, что исследования [3] проводились в неустановившемся температурном режиме.

Прохождение через пластину постоянного тока радикально меняет картину звукового отклика. В получаемых при токовом воздействии спектрах можно видеть отчетливо выраженный максимум при $f \approx 0.25 \text{ Hz}$. Амплитуда сигнала остается постоянной даже после 36 h

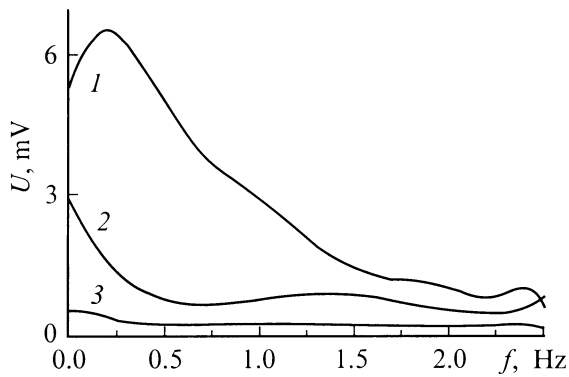


Рис. 1. Спектральная плотность мощности сигнала АЭ при пропускании тока $j = 2.8 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ и внешнем нагреве до 380 К дислокационных (1) и бездислокационных (3) образцов; при внешнем нагреве до 380 К без токового воздействия (2).

термостатирования. Поэтому основной цикл исследований проводился после двухчасовой выдержки при постоянной температуре.

Типичные результаты, представленные на рис. 1, наглядно демонстрируют акустоэмиссионный отклик полупроводника при наличии в нем дислокаций. Так, в установившемся температурном режиме, при пропускании тока $j = 2.8 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$ сигнал акустической эмиссии от образцов с введенными дислокациями (1, рис. 1) значительно превышает акустический отклик бездислокационных пластин (3, рис. 1). Столь разительные отличия могут быть связаны лишь со срывом закрепленных дислокаций и их движением в постоянном электрическом поле, что согласуется с наблюдениями авторов работы [3] (не исключено влияние термоупругих напряжений, оценка вклада которых требует дополнительных исследований и выходит за рамки настоящей работы). Дислокация, обладая зарядом и эффективной массой, должна откликаться на действие электрического поля (увлечение полем и электронным либо дырочным ветром), создающего механическое напряжение, превышающее напряжение Пайерлса σ_p [6]. В этом случае дислокация преодолевает потенциальный барьер в кристалле и смещается из положения равновесия. При температуре, отличной от нуля, из-за некогерентного теплового

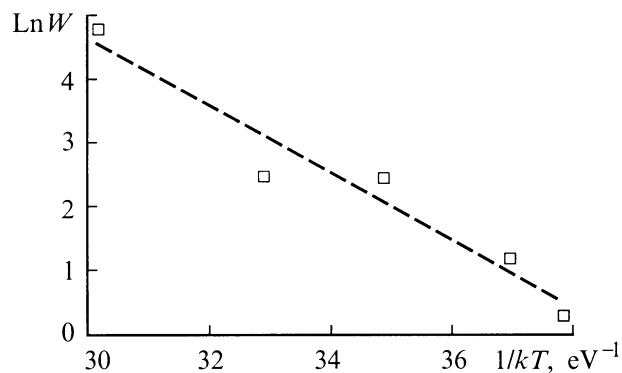


Рис. 2. Температурная зависимость энергии акустических колебаний дислокационной кремниевой пластины при протекании постоянного тока плотностью $j = 2.8 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$.

движения атомов происходит размытие потенциального рельефа, приводящего к уменьшению σ_p . Скорость перехода v из одного состояния в другое [4,5] может быть оценена как

$$v = (1 - f)v_1 \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right), \quad (1)$$

где f — доля дислокаций, претерпевающих отрыв с энергией активации E_d ; v_1 — эффективная частота перехода, определяющая максимум в спектре сигналов акустической эмиссии (0.25 Hz), полученных для дислокационных образцов. Температура, как это следует из (1), оказывает определяющее влияние на v . Это подтверждено нашими исследованиями, зафиксировавшими 1.5-кратное увеличение амплитуды регистрирующего сигнала при изменении температуры пластины с 380 до 450 К. Для более точной оценки температурных изменений сигналов АЭ рассчитывалась их энергия W . Результаты этих расчетов приведены на рис. 2. Найденное значение $E_d = 0.53 \pm 0.05 \text{ eV}$ является типичным для перемещения дислокаций в элементарных полупроводниках. Так, независимые исследования для германия дали $E_d \approx 0.55 \text{ eV}$ [6].

В дополнение к сказанному следует отметить, что в отсутствие постоянного электрического поля акустоэмиссионный отклик дисло-

кационных образцов (2, рис. 1) всегда превышает соответствующий отклик бездислокационных пластин (3, рис. 1). Этот результат кажется неожиданным, если учесть явную недостаточность тепловой энергии $E_{кТ} = 0.025-0.037$ eV в преодолении дислокацией потенциального барьера $E_d = 0.53$ eV. Мы полагаем, что кажущееся противоречие может быть объяснено лишь с учетом больцмановского распределения энергии.

Таким образом, возникновение акустической эмиссии в дислокационных пластинах кремния обусловлено срывом и движением дислокаций под воздействием стационарных тепловых ($T \approx 400$ К) и электрических полей ($j = 2.8 \cdot 10^5$ А/м²). Любые температурные отклонения от стационарного значения, сопровождаются появлением дополнительного акустического отклика, искажающего истинную картину акустоэмиссии. Возмущающее воздействие этого фактора резко возрастает по мере удаления системы от состояния равновесия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкомвуза.

Список литературы

- [1] *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. М., 1976. 272 с.
- [2] *Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975. 255 с.
- [3] *Калитенко В.А., Кучеров И.Я., Перга В.М.* // Физика и техника полупроводников. 1988. Т. 22. В. 4. С. 578–581.
- [4] *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
- [5] *Пелещак Р.М., Лукаянец Б.А.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 2. С. 37–42.
- [6] *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.