

Акустоэмиссионное зондирование линейных дефектов в кремнии

© А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.А. Соловьев

Ульяновский государственный университет,
432700 Ульяновск, Россия

(Поступила в Редакцию 14 июля 2000 г.
В окончательной редакции 5 октября 2000 г.)

Исследована акустическая эмиссия донорного кремния. Показано, что звуковое излучение обусловлено электростимулированным движением краевых дислокаций. Обнаружена корреляция максимума спектра акустической эмиссии кремния и скорости движения линейных дефектов при варьировании плотности тока, текущего через дислокационный образец. Согласование теории с экспериментом позволило оценить численные значения коэффициентов диффузии атомов в дислокационной примесной атмосфере и эффективного заряда, приходящегося на один атом дислокационной линии при различных временах (0.3–3 h) изотермического отжига (1273 K) кремниевых образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Минвуза "Деградационные процессы в многослойных тонкопленочных структурах" и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 98-02-03335.

С середины пятидесятых годов известно об акустической эмиссии (АЭ), т.е. излучении упругих волн, сопровождающих перестройку внутренней структуры конденсированных сред [1–3]. Физическим механизмом, объясняющим ряд особенностей АЭ дислокационных кристаллов, является движение дислокаций и их скопления. Привлекательность АЭ в этом случае определяется тем, что источником звука являются сами дислокации, благодаря чему задача обнаружения и локализации дефектов упрощается. Более того, сигналы АЭ в этом случае несут информацию о кинетике и механизмах движения дефектов [1,3].

Несмотря на это, работ, посвященных акустоэмиссии полупроводников, крайне мало. Кроме того, практически отсутствует сравнительный анализ движения дислокаций и спектрального состава акустического шума в полупроводниках. Не затронута также акустоэмиссия легированного полупроводника после термических обработок. Поэтому в данной работе предпринята попытка анализа АЭ кремния и сопоставления ее с электростимулированной динамикой линейных дефектов при различных режимах термообработки дислокационных образцов кремния.

Объектами исследования служили пластины бездислокационного монокристаллического кремния *n*-типа (фосфор) и *p*-типа (бор) с удельным сопротивлением 0.01–0.05 $\Omega \cdot \text{cm}$, ориентацией [111] и размером $15 \times 5 \times 0.4 \text{ mm}$ по направлениям [112], [110] и [111] соответственно. Дислокации подобно [4] вводились путем выдержки пластин под нагрузкой, ориентированной вдоль оси [111]. Плотность дефектов не превышала $N_d \leq 1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$. Изотермический отжиг дислокационных образцов в течение 0.3–3 h осуществлялся в резистивной печи при температуре 1273 K.

АЭ вызывалась электростимулированным движением краевых дислокаций без дополнительных механических нагрузок. Для этого через образец в направлении [112]

пропускался электрический ток ($j < 5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$). Корректировка температуры осуществлялась внешним резистивным нагревателем ($T \leq 430 \text{ K}$). Сигналы АЭ $U(t)$ фиксировались пьезоэлектрическим датчиком, лежащим на поверхности исследуемой пластины по методике [4]. Спектральный состав сигналов АЭ $U(\omega)$ выявлялся с помощью Фурье-анализа исходной осциллограммы $U(t)$ [4,5].

Результаты исследования показали существенное отличие сигналов АЭ при переходе от бездислокационных (кривая 1 на рис. 1) к дислокационным образцам кремния (кривая 2 на рис. 1). Причем увеличение средней плотности дислокаций в образце N_d при неизменных параметрах электроэкспозиции активизирует акустоэмиссионные процессы (ср. кривые 2–4 на рис. 1), что наглядно свидетельствует о "дислокационной природе" наблюдаемого отклика.

Для описания характера движения дефектов рассмотрим поле излучения V_i , создаваемое системой движущихся

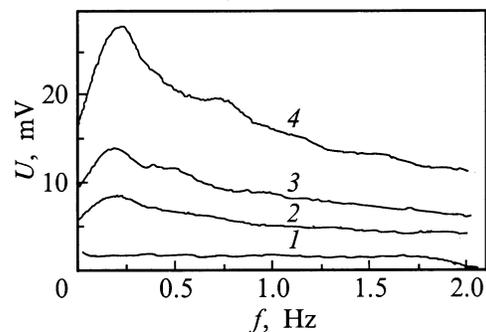


Рис. 1. Спектры акустической эмиссии дислокационных образцов донорного кремния при прохождении через них тока плотностью $4.5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$. 1 — бездислокационный образец; плотность дислокаций (cm^{-2}): 2 — $8 \cdot 10^5$, 3 — $2 \cdot 10^6$, 4 — $5 \cdot 10^6$.

щихся дислокаций [6]

$$\rho \frac{\partial V_i(r, t)}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ik}(r, t)}{\partial x_k} = f_i(r, t). \quad (1)$$

Здесь вектор f_i характеризует объемные силы движения элементов кристалла, σ_{ik} — тензор напряжений, создаваемых системой движущихся дислокаций, ρ — плотность кристалла. Поле излучения при движении дислокаций определяется выражением [6]

$$V_i(r, \tau) = -\frac{c_t}{2\pi r} \sum_{m=l,t} \frac{\Phi_{iks}^{(m)}}{c_m^3} \int \frac{\partial^2}{\partial t^2} j_{ks} dr. \quad (2)$$

Здесь индекс m принимает значения l и t , соответствующие продольным и поперечным волнам, c_m — скорость соответствующих звуковых волн, величины $\Phi_{iks}^{(m)}$ являются функциями волновых нормалей n_i, n_k, n_s, j_{ks} — тензор плотности потока дислокаций. Из выражения (2) видно, что излучение системы дислокаций (акустическое поле) $V_i(r, \tau)$ следует ожидать лишь при нестационарном их движении, когда вторая производная от тензора плотности потока дислокации j_{ks} отлична от нуля. Это означает, что появление сигнала акустоэмиссии в процессе электростимулированной пластификации дислокационного кремния возможно только при движении дислокаций с переменной скоростью. В этом случае средняя скорость направленной миграции дефектов v будет связана с наиболее характерной частотой перехода дислокаций из одного устойчивого состояния в другое f_{\max} следующим образом:

$$v = a f_{\max}. \quad (3)$$

Здесь a — величина одного скачка.

Для проверки соотношения (3) измерение спектров АЭ осуществлялось одновременно с контролем скорости миграции дислокаций в электрическом поле методом повторного избирательного травления [5]. Анализ пробегов линейных дефектов, проведенный нами по ~ 100 индивидуальным дислокациям, свидетельствует о преимущественном движении краевых дислокаций в n -Si к положительному электроду, а в p -Si — к отрицательному. Результаты этих исследований для фиксированной плотности тока приведены на рис. 2. Увеличение j приводит к закономерному возрастанию скорости перемещения краевых дислокаций в кремнии и смещению максимума спектра АЭ в более высокочастотную область. Результаты этих исследований приведены на рис. 3, с помощью которого по наклону v от f_{\max} определена величина $a = 0.13$ нм, что соответствует межплоскостному расстоянию для серии плоскостей (111) кремния (0.134 нм).

Таким образом, проходящий через образец электрический ток вытесняет дислокации даже при комнатных температурах, что непосредственно отражается на спектрах АЭ. Учет электростимулированного влияния на направленный транспорт дислокации, состоящего из сил

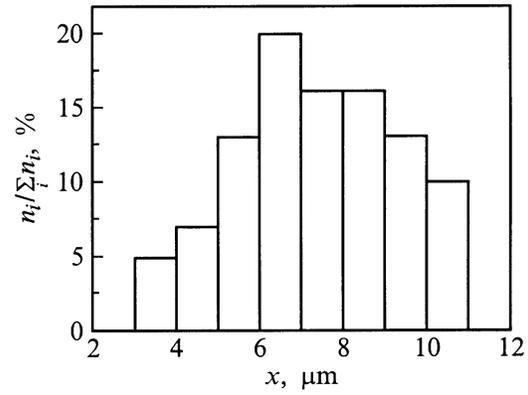


Рис. 2. Распределение дислокационных пробегов (x) в n -кремнии ($\rho = 0.015 \Omega \cdot \text{cm}$) при электроотжиге $j = 3 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$. Средняя плотность дислокаций в образце $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$.

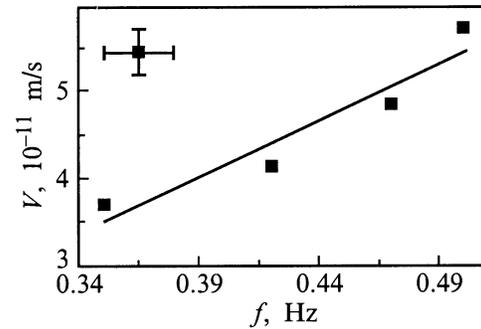


Рис. 3. Зависимость скорости вытеснения дислокаций электрическим током v от максимума спектра акустической эмиссии f_{\max} при одинаковых параметрах электроэкспозиции образцов кремния n -типа ($0.015 \Omega \cdot \text{cm}$).

ионного увлечения и электронного (дырочного) ветра, позволяет связать величины j и f_{\max} соотношением [5]

$$j = \frac{1}{\Phi_1} \left(\frac{E_p p}{kT} + \ln(\Phi_2 f_{\max}) + \Phi_3 f_{\max} \left(\ln \frac{f_{\max}}{\Phi_4} \right) \right), \quad (4)$$

где размерные константы

$$\Phi_1 = \frac{e Z_{\text{eff}} N_{\text{at}} b \rho}{kT}, \quad \Phi_2 = \frac{a}{V_0},$$

$$\Phi_3 = \frac{\pi c_0 \gamma L b a}{2 D_d (kT)^2}, \quad \Phi_4 = \frac{D_d}{a r_0}.$$

Здесь $N_{\text{at}}, Z_{\text{eff}}$ — число атомов и эффективный заряд, приходящиеся на единицу длины дислокации при наличии примесной атмосферы, n, p, l_n и l_p — равновесные концентрации и длины свободного пробега электронов и дырок, e — элементарный заряд; L — длина дислокации, D_d — коэффициент диффузии атомов в пределах дефектной области примесной атмосферы, c_0 — равновесная концентрация примеси в бездефектной области кристалла, γ — размерная константа, b — вектор Бюргерса, V_0 — размерная константа скорости [5].

Основные параметры электропереноса в дислокационном ($1 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$) легированном фосфором кремнии n -типа ($\rho = 1.5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$, $c_0 = 7 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$)

Время отжига t , min	r_0 , nm	$\Phi_1 \cdot 10^7$, m^2/A	$\Phi_2 \cdot 10^5$, s	Φ_3 , s	Φ_4 , s^{-1}	Z_{eff} , 1/atom	$V_0 \cdot 10^5$, m/s	$D_d \cdot 10^{18}$, m^2/s
20	5.8	3.5	0.723	4.23	1.75	0.012	1.8	1.3
70	7.2	3.3	1.070	6.53	1.11	0.011	1.2	1.0
115	8.9	3.1	1.357	8.35	0.86	0.011	0.96	1.0
175	9.9	1.7	1.305	8.32	0.85	0.006	0.96	1.0

Видно, что увеличение токовых нагрузок должно сопровождаться смещением максимума спектра АЭ по оси частот. Кривая 1 на рис. 4 наглядно иллюстрирует это на примере донорного кремния. При найденных значениях Φ_i (см. таблицу) и барьера Пайерлса II рода ($E_{p2} \approx 0.5 \text{ eV}$) [4] наблюдается хорошее согласование эксперимента с уравнением (2). Это позволяет определить величину эффективного заряда Z_{eff} и коэффициента диффузии D_d .

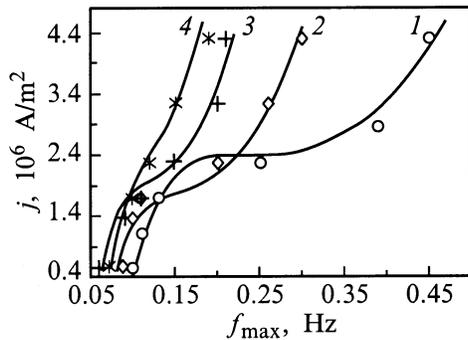


Рис. 4. Токвая зависимость максимума спектров акустической эмиссии при различных временах изотермического отжига образцов ($T_{\text{ан}} = 1273 \text{ K}$). t (min): 1 — 20, 2 — 70, 3 — 115, 4 — 175.

АЭ в полупроводнике, как это следует из (2), несет информацию о транспортных процессах с участием линейных дефектов. Поэтому изменение состояния объекта ядро дислокации–примесное облако должно приводить к изменению динамики эмиссионных спектров. Для проверки этого нами проводился ряд экспериментов по снятию токовых зависимостей f_{max} после изотермического отжига.

Результаты исследований показали, что увеличение времени термической ”нагрузки” способствует изменению токовой зависимости f_{max} и, следовательно, v . Действительно, при изотермическом отжиге дислокационных образцов размер примесной атмосферы r_a вокруг дислокации увеличивается в соответствии с уравнением [7]

$$r_0^4 = 8 \frac{DWb^2t}{kT}, \quad (5)$$

где D — коэффициент объемной диффузии атомов примеси, W — энергия связи, kT — тепловая энергия,

t — время термообработки. Поэтому изменение времени отжига с 20 до 175 min приводит к 50% увеличению r_0 (см. таблицу). Это не может не отразиться на подвижности дефектов в результате ”утяжеления” примесной атмосферы, что проявляется в двукратном уменьшении величины эффективного заряда, приходящегося на единицу длины дислокации при наличии примесной атмосферы (см. таблицу). Иллюстрацией рассматриваемых процессов является рис. 4, где отражено изменение дислокационной кинетики на спектрах АЭ после изотермических отжигов. Так, наибольшие изменения $\left. \frac{\partial f_{\text{max}}}{\partial j} \right|_{t=0.5 \text{ h}} = 10^{-6} (\text{Hz} \cdot \text{m}^2)/\text{A}$ и $\left. \frac{\partial f_{\text{max}}}{\partial j} \right|_{t=3 \text{ h}} = 4 \cdot 10^{-7} (\text{Hz} \cdot \text{m}^2)/\text{A}$ для различных времен отжига отличаются более чем в 2 раза.

Таким образом, в настоящей работе исследована акустическая эмиссия при электростимулированном движении краевых дислокаций в кремнии, а также влияние на нее изотермических отжигов. Обнаружена четкая корреляция максимума спектра акустической эмиссии кремния и скорости движения линейных дефектов при варьировании плотности тока, протекающего через дислокационный образец. Предполагаемый механизм перемещения дислокации связан с переходом дислокации (или ее фрагмента) в соседнее метастабильное состояние с диффузионным увлечением атомов примеси к ее новому положению. Показано, что увеличение времени отжига дислокационных образцов полупроводника приводит к уменьшению подвижности линейных дефектов.

Список литературы

- [1] В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. Акустическая эмиссия. Издво стандартов, М. (1976). 243 с.
- [2] Т. Судзуки, Х. Есиага, С. Такеути. Динамика дислокаций и пластичность. Мир, М. (1989). 296 с.
- [3] А.М. Косевич. Дислокации в теории упругости. Наук. думка, Киев (1978). 234 с.
- [4] А.М. Орлов, А.А. Скворцов, В.А. Фролов. Письма в ЖТФ **25**, 3, 28 (1999).
- [5] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов, А.А. Соловьев. ФТТ **42**, 11, 1998 (2000).
- [6] В.Д. Нацк, К.А. Чишко. ФТТ **14**, 11, 3126 (1972).
- [7] Ж. Фридель. Дислокации. Мир, М. (1967). 626 с.