

УДК 537.311.322

© 1992

НЕУПРУГАЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ

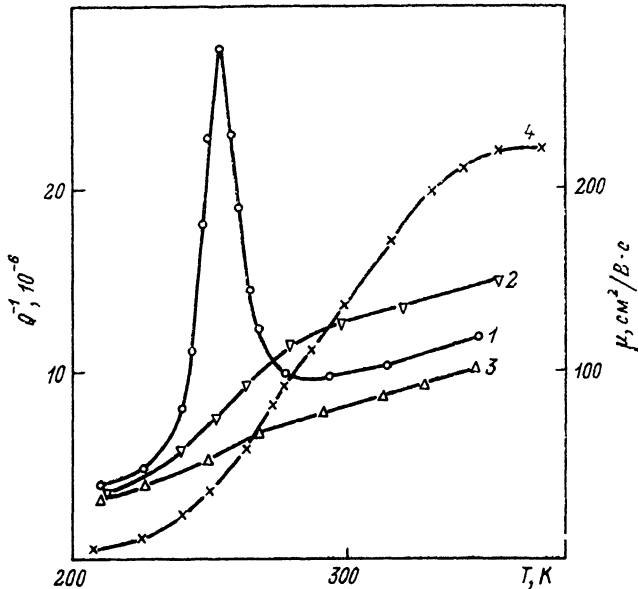
В. С. Борисов, Ю. А. Капустин, В. И. Кириллов

В монокристаллах кремния p -типа, выращенных по методу Чохральского и компенсированных золотом, исследованы температурные зависимости внутреннего трения (ВТ), тангенса угла диэлектрических потерь и холловской подвижности. Обнаружено, что в области температур ≈ 250 К наблюдаются λ -максимум ВТ и изменение характера температурной зависимости холловской подвижности. Исследование тангенса угла диэлектрических потерь в данных образцах показало существование процессов, характеризующихся максвелл-вагнеровской релаксацией объемного заряда. Все полученные экспериментальные результаты объясняются неоднородным распределением компенсирующей примеси (золота) и образованием при этом крупномасштабного потенциального рельефа.

В [1] установлено, что явление диэлектрической релаксации (ДР) в компенсированном кремнии может быть обусловлено релаксацией объемного заряда, возникающего в результате образования электрически неоднородных областей, обусловленных неравномерным распределением компенсирующей примеси (золота) и возникновением при этом крупномасштабного потенциального рельефа. В [2] считается, что явление ДР в компенсированном арсениде галлия также связано с изменением свойств носителей заряда с температурой, которое авторы связывают с электронным фазовым переходом [2]. С целью дальнейшего исследования природы электрических неоднородностей и свойств носителей заряда в компенсированных полупроводниках в настоящей работе предпринято комплексное исследование эффекта Холла, диэлектрической и неупругой релаксации в кремнии p -типа, компенсированном золотом. Исследование неупругой релаксации проводилось путем измерений температурно-частотных зависимостей внутреннего трения (ВТ) на установке, описанной в [3]. Частота изгибных колебаний образца при этом составляла ~ 10 кГц. Исследование ДР проводилось путем измерений температурно-частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и действительной части полной проводимости образца по методике [1].

В качестве исходных образцов использовались монокристаллы кремния p -типа, выращенные по методу Чохральского и легированные бором до удельного сопротивления ≈ 1 Ом \cdot см. Легирование золотом проводилось путем диффузии из слоя металла, термически напыленного на поверхность образцов. Температура и время диффузии составляли 1200 °С и 20 ч соответственно. После этого образцы закаливались на воздухе, а непродиффундировавшее золото удалялось в царской водке. Далее приповерхностный слой образцов толщиной ≈ 60 мкм удалялся путем механической и химической полировок. Удельное сопротивление образцов, компенсированных таким образом, составляло $\sim 10^3$ Ом \cdot см. Кроме того, такой же термообработке подвергались контрольные образцы.

На рисунке приведены типичные зависимости ВТ от температуры в компенсированных и контрольных образцах. Как видно из этого рисунка, в ком-



Температурная зависимость ВТ (1—3) и холловской подвижности (4) в компенсированном кремнии (1, 2, 4) и контрольном образце (3).

Частота колебаний образца при измерении ВТ 4.8 (1, 3) и 23 кГц (2).

пенсированных образцах в области температур ≈ 250 К на частоте ≈ 10 кГц наблюдались максимумы ВТ, которые отсутствовали в контрольных образцах. Обнаруженные максимумы хорошо воспроизводились как при нагреве образцов, так и при охлаждении. Увеличение частоты колебаний образца приводило к значительному снижению высоты максимума, и уже на частоте 23 кГц на температурной зависимости ВТ в области температур ≈ 250 К максимум не наблюдался. Вместе с тем изменение частоты колебаний образца не изменяло температурного положения максимума.

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что наблюдаемый максимум ВТ не связан с термоактивируемыми релаксационными процессами, обусловленными переориентацией точечных дефектов и электронным перераспределением между ГУ и соответствующей энергетической зоной [4]. Об этом же свидетельствуют ширина и λ -форма наблюдаемого максимума, которая описывалась выражениями $Q^{-1}(T) = (T - T_m)^k$ и $Q^{-1}(T) \sim (T_m - T)^k$, где T_m — температура максимума, $k = -2$ при $T > T_m$ и $k = -3/2$ при $T < T_m$; $Q^{-1}(T)/Q_m^{-1} \ll 1$. Приведенные свойства описанного λ -максимума ВТ характерны для фазовых переходов второго рода (λ -переходов) [4]. Причем исследование эффекта Холла в компенсированных образцах показало, что в области температур, соответствующих λ -максимуму ВТ, в компенсированных образцах наблюдается изменение характера зависимости холловской подвижности (см. рисунок). Это свидетельствует о том, что в области максимума ВТ происходит смена механизма рассеяния свободных носителей: степенная зависимость холловской подвижности от температуры, характерная для рассеяния на заряженных примесных центрах с понижением температуры, переходит в экспоненциальную зависимость, характерную для рассеяния на макроскопических, обтекаемых током, высокоомных неоднородностях (см. например, [5, 6]). Такие неоднородности могут представлять собой области «скопления» атомов компенсирующей примеси (золота), значительная часть которых находится в заряженном состоянии. Последнее приводит к возникновению крупномасштабного потенциального рельефа, дополнительных

электрических полей, поляризации решеток и, следовательно, дополнительной деформации решетки образца за счет явления электрострикции. Величина этой деформации в кремнии мала, но тем не менее возникновение на температурной зависимости ВТ λ -максимума может быть связано с этим явлением. Так, известно [4], что подобное неупругое поведение может быть обусловлено резким изменением внутреннего термодинамического параметра (параметра «упорядочения»). Таким параметром в исследуемых нами образцах, по-видимому, является величина дополнительной деформации кристаллической решетки δ_d , возникающая из-за неоднородного распределения компенсирующей примеси золота. Высоту максимума ВТ в этом случае можно оценить из соотношения

$$Q_m^{-1} \approx \delta / \delta_0, \quad (1)$$

где δ — неупругая (остаточная) деформация решетки, обусловленная взаимодействием внешней знакопеременной деформации δ_0 с дополнительной деформацией δ_d . Используя экспериментальные значения $\delta_0 = 10^{-7}$ и $Q_m^{-1} = 10^{-5}$, получим, что $\delta = 10^{-12}$.

Необходимо отметить, что обнаруженный максимум ВТ обладал фоточувствительностью: облучение образца светом с энергией фотонов 0.4—1.1 эВ и интенсивностью $\sim 10^{19} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ приводило к его уменьшению. Этот факт подтверждает наличие заряженных областей в компенсированном золотом *p*-кремнии, которые представляют собой области скопления примеси золота, находящиеся в заряженном состоянии. Подсветка образцов переводит часть заряженных центров Au^+ в нейтральное состояние Au^0 , тем самым уменьшая величину дополнительного электрического поля и связанной с ним деформации решетки, характеризуемой величиной δ_d и, следовательно, δ и Q_m^{-1} в соотношении (1).

Как уже отмечалось выше, для возникновения λ -максимума ВТ необходимо аномально быстрое изменение «внутреннего параметра» (в нашем случае величины δ_d) с температурой, которое может быть связано с переходом «порядок—беспорядок» [4]. Одним из возможных механизмов, контролирующих этот процесс, на наш взгляд, может быть изменение условий экранировки заряженных областей в компенсированном кремнии в области температур λ -максимума ВТ, которое может приводить к быстрому изменению дополнительных электрических и упругих полей в области температур 250 К и, следовательно, возникновению λ -максимума ВТ.

О наличии электрически неоднородных областей в наших образцах свидетельствуют также исследования температурно-частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и действительной части полной проводимости образцов, в которых обнаружен λ -максимум ВТ. Установлено, что на температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь таких образцов имеются релаксационные максимумы, по своим свойствам практически полностью идентичные обнаруженным нами ранее [1]. Время диэлектрической релаксации для образца, температурная зависимость ВТ и подвижности которого представлены на рисунке, определялось соотношением

$$\tau = 2 \cdot 10^{-14} \exp(0.28 / kT). \quad (2)$$

Как и в [1], величина τ значительно отличалась как от максвелловского времени релаксации для данных образцов, так и от времени термической эмиссии носителей заряда с ГУ золота, а в области температур, соответствующих максимуму тангенса угла диэлектрических потерь, наблюдалась частотная дисперсия действительной части полной проводимости образцов.

В [1] нами предложен механизм этого явления ДР, состоящий в максвелл-вагнеровской релаксации объемного заряда, обусловленного электрическими неоднородностями, возникающими из-за неоднородного распределения компенсирующей примеси. Таким образом, исследования диэлектрической релаксации и действительной части полной проводимости образцов находятся в хорошем соответствии с исследованиями ВТ и эффекта Холла. Все приведенные здесь и в [1] результаты достаточно убедительно, на наш взгляд, объясняются с единой точки зрения, основанной на образовании в компенсированном кремнии электрически неоднородных областей.

Список литературы

- [1] Постников В. С., Борисов В. С., Капустин Ю. А., Кириллов В. И. // ФТП. 1990. Т. 24. № 5. С. 855—859.
- [2] Johnscher A. K., Pickup C. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1985. V. 18. P. L343—L349.
- [3] Постников В. С., Капустин Ю. А., Борисов В. С., Шлык Ю. К. // ПТЭ. 1985. № 1. С. 180—182.
- [4] Новик А. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975.
- [5] Шик А. Я. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. № 1. С. 14—19.
- [6] Шик А. Я. // ФТП. 1976. Т. 10. № 6. С. 1115—1118.

Воронежский
технологический институт

Поступило в Редакцию
19 декабря 1991 г.

