

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭФФЕКТЕ ПОЛЯ

С. Г. Калашников, А. И. Морозов, В. И. Федосов,
В. И. Анисимкин

Показано, что при воздействии высокочастотного внешнего электрического поля постоянная составляющая проводимости полупроводника может существенно изменяться вследствие участия в электронном обмене поверхностных уровней. Указана возможная связь этого эффекта с некоторыми акустоэлектронными явлениями.

При воздействии на поверхность полупроводника внешнего электрического поля электропроводность полупроводника изменяется (эффект поля [1]). При переменном поле $E_1 \exp(i\omega t)$, индуцирующем на единице поверхности заряд $Q_1 \exp(i\omega t)$, в электропроводности появляется составляющая $\Delta G(\omega t)$, которая обычно и исследуется при изучении ВЧ эффекта поля [2,3]. При этом "эффективная подвижность" $\mu_{\text{эфф}} < \mu_n + \mu_p$, где μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок.

Однако в изменении проводимости образца может возникать и постоянная составляющая $\Delta \bar{G}$. Последняя может также изменяться со временем, но аperiодически и гораздо более медленно, и на порядки превышать $\Delta G(\omega t)$. На это обстоятельство, насколько нам известно, не обращалось внимания при изучении ВЧ эффекта поля.¹⁾ Соответственно, эффективная подвижность, определяемая нами в данном случае как $\bar{\mu}_{\text{эфф}} = \Delta \bar{G} / Q_1$, может быть больше $\mu_n + \mu_p$.

Опыты проводились при комнатной температуре на пластинках Si при собственной подсветке (темновое сопротивление $10^3 + 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$) и собственного Ge без подсветки ($N_D + N_A < 10^{12} \text{ см}^{-3}$), толщиной $d = 0,3 + 0,8 \text{ мм}$ ($d \gg$ длины Дебая; $d \sim$ длины диффузии, L). Длительность высокочастотного ВЧ импульса была $10^{-5} + 10^{-2} \text{ сек}$. В каждый момент времени обе поверхности полупроводника заряжались разноименно (рис. 1). Ваземление выходной катушки ВЧ генератора выбиралось так, чтобы через контакты образца протекал минимальный ВЧ ток. В случае тождественности обеих поверхностей обкладок и равенстве амплитуд ВЧ поля $\Delta G(\omega t)$ должно равняться нулю.

¹⁾ Подчеркнем, что рассматриваемый эффект отличается от так называемого "эффекта накопления", наблюдаемого при постоянном поле или на низкой частоте (1). Величина последнего на несколько порядков меньше, а время установления — на несколько порядков больше.

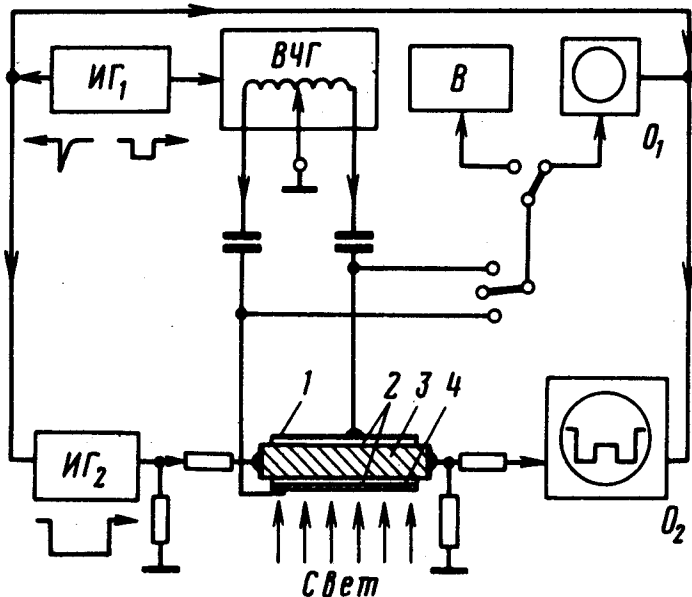


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 – непрозрачный электрод, 2 – слюда, 3 – образец, 4 – прозрачный электрод. ИГ₁, ИГ₂ – импульсные генераторы, О₁, О₂ – социллографы, ВЧГ – высокочастотный генератор, В – вольтметр

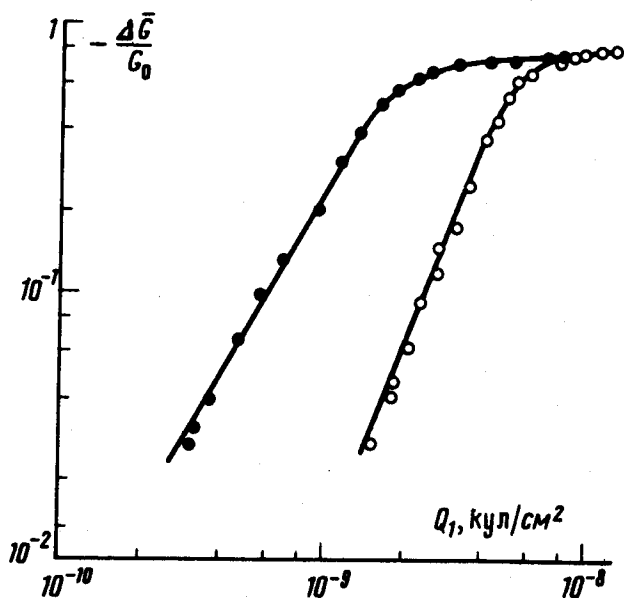


Рис. 2. Зависимость $\Delta \bar{G} / G_0$ от амплитуды индуцированного заряда, Q_1 : ● – Si, $G_0 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ ом}^{-1}$, $f = 10,5 \text{ МГц}$; ○ – Ge, $G_0 = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ ом}^{-1}$, $f = 16,5 \text{ МГц}$

Опыты показали, что $\Delta \bar{G}$ всегда соответствовало уменьшению проводимости образцов, а $\Delta \bar{G} / G_0$ достигало величины 70 – 80% (рис. 2). Максимальные значения $\bar{\mu}_{\text{эфф}}$ были $1,8 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ для Ge и $7,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ для Si. Эти величины существенно превышают $\mu_n + \mu_p$. Эффект не был связан с выпрямлением просачивающегося ВЧ сигнала в контактах: $\Delta \bar{G} / G_0$ не зависело от величины импульса тока и не менялось при увеличении просачивающегося ВЧ сигнала в десятки раз.

Наблюдаемый эффект мы объясняем следующим образом. Для его возникновения существенно, чтобы $\tau_M < T < \tau_S$, где τ_M — максвелловское время, $T = 2\pi/\omega$, τ_S — время релаксации поверхностных уровней (ПУ). При $T < \tau_S$ заполнение ПУ за время T не успевает измениться и ВЧ поле слабо экранируется ПУ. Вследствие нелинейной зависимости концентраций носителей заряда у поверхности от внешнего поля, средние их значения за период, $\langle n_S \rangle$, $\langle p_S \rangle$, отличаются от значений в отсутствие поля, n_{S0} и p_{S0} . Это приводит, во-первых к медленному (по сравнению с T) изменению заполнения ПУ и поверхностного заряда, а следовательно и средней проводимости слоя объемного заряда (СОЗ). И, во-вторых, к изменению темпа поверхностной рекомбинации, ΔR_S , что вызывает изменение проводимости и в квазинейтральной области (на глубине $\sim L \gg$ толщины СОЗ).

Из сказанного следует, что $\Delta \bar{G}/G_0$ должно увеличиваться при переходе от низких частот ($\omega\tau_S < 1$) к высоким ($\omega\tau_S > 1$). Это действительно наблюдалось на опыте (рис. 3). Величина эффекта зависела от обработки поверхности (которая меняет ПУ и начальный изгиб зоны) и подсветки (изменяющей начальные концентрации свободных носителей и заполнение ПУ).

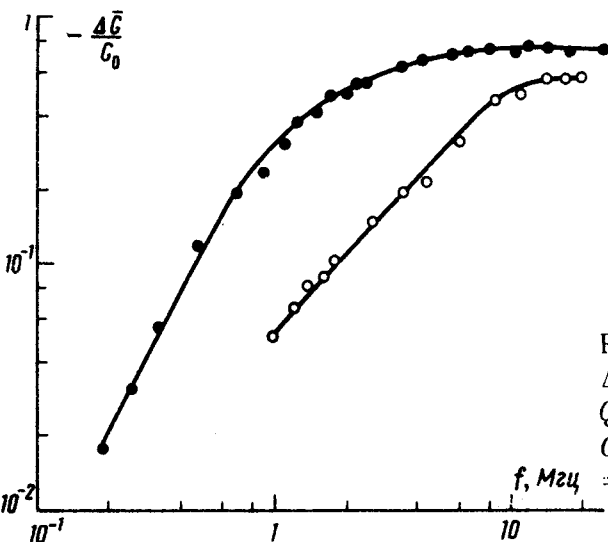


Рис. 3. Частотная зависимость $\Delta \bar{G}/G_0$: ● — Si, $G_0 = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ ом}^{-1}$, $Q_1 = 3,8 \cdot 10^{-9} \text{ кулон/см}^2$; ○ — Ge, $G_0 = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ ом}^{-1}$, $Q_1 = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{ кулон/см}^2$

Количественный расчет с использованием метода усреднений Боголюбова подтвердил рассмотренную качественную модель. (Он показал, что относительная роль СОЗ и области квазинейтральности в изменении проводимости зависит от параметров образца. Так, если концентрации электронов и дырок в объеме не сильно отличаются, то влияние ΔR_S может быть определяющим. При этом большая величина ΔR_S может быть вызвана а) увеличением $\langle n_S \rangle$ и $\langle p_S \rangle$ и б) перезарядкой ПУ разного типа. Изменение заполнения разных ПУ может быть велико, даже если суммарный заряд поверхности меняется мало. В этом случае большое $\Delta \bar{G}/G_0$ возможно даже в толстых образцах ($d \sim L$), а $\bar{\mu}_{\text{эфф}}$ может быть больше ($\mu_n + \mu_p$). Именно это мы и име-

ли в наших опытах. Расчет также показывает, что вследствие накопления заряда на ПУ тип проводимости поверхностного слоя под действием ВЧ поля может измениться на обратный.

Если же концентрация неосновных носителей в объеме мала, то $\Delta \bar{G}/G_0$ обусловлено, главным образом, изменением проводимости СОЗ. Здесь большое $\Delta \bar{G}/G_0$ возможно только в тонких образцах ($d \sim$ толщины СОЗ), а в отсутствие инверсного слоя $\bar{\mu}_{эфф}$ меньше μ основных носителей. При наличии инверсного слоя, этот последний под действием ВЧ поля может исчезнуть.

Указанные особенности ВЧ эффекта поля могут проявляться в некоторых акустоэлектронных явлениях. Так наблюдавшееся в работах [4, 5] изменение проводимости пластинок кремния под действием поверхностной звуковой волны (ПЗВ) в слоистой структуре пьезоэлектрик-кремний может быть обусловлено ВЧ эффектом поля, вследствие наличия нормальной к поверхности компоненты электрического поля [4]. Рассчитанная нами по данным [4] $\bar{\mu}_{эфф}$ оказалась $\sim 10^2 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, что существенно меньше μ_n . Это соответствует случаю примесных тонких образцов, использованных в работе [4]. Далее, в работе [6] наблюдалось изменение знака продольного акустоэлектрического эффекта в слоистой структуре $\text{LiNbO}_3 - \text{Si}$ при увеличении мощности ПЗВ. Рассмотренная выше модель показывает, что это изменение знака может быть обусловлено не только врожденным инверсионным слоем [6], но и его возникновением или уничтожением под действием ВЧ электрического поля ПЗВ.

Мы выражаем благодарность Я.Е.Покровскому и Э.Э.Годику за обсуждение эксперимента.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 января 1975 г.

Литература

- [1] А.В.Ржанов. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., изд. Наука, 1971 г.
- [2] Н.С. Montgomery. Phys. Rev., 106, 441, 1957.
- [3] А.Э. Юнович. ФТТ, 1, 908, 1959.
- [4] С. Fischler, J. Zucker, E.M. Conwell. Appl. Phys. Lett., 17, 252, 1970.
- [5] А.М. Кмита, А.Б. Медведь. ФТТ, 14, 2646, 1972.
- [6] С.Г. Калашников, А.И. Морозов, М.А. Земляничин. Письма в ЖЭТФ, 16 - 170, 1972.