

ФОТОЭДС НА pn - ПЕРЕХОДЕ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ ПРИ
ИНТЕНСИВНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Л.М.Блинов, В.С.Вавилов, Г.Н.Галкин

Большинство теоретических и почти все экспериментальные работы, где изучалась фотоэдс в кристаллах с pn - переходами, ограничивались исследованием случаев сравнительно слабого возбуждения ($\Delta n, \Delta p \ll n_n, p_p$)^[1]. В этих условиях фотоэдс зависит от интенсивности света логарифмически [1].

Однако из простых соображений, подтвержденных расчетом [2], следует, что в случае очень сильного возбуждения ($\Delta n, \Delta p \gg n_n, p_p$) потенциальный барьер pn - перехода практически исчезает, и фотоэдс должна приближаться к контактной разности потенциалов (к.р.п.).

Насыщение фотоэдс под действием импульсов излучения оптического квантового генератора (ОКГ) наблюдалось экспериментально в кремниевых фотоэлементах [3]. Поскольку предельная э.д.с. уменьшалась с увеличением температуры образца и удельного сопротивления ρ - области, автор сделал вывод, что с помощью ОКГ можно определить к.р.п., однако не привел количественных результатов.

Мы изучали зависимость фотоздс от мощности потока излучения, падающего на кристалл кремния с pn - переходом. Источником света служил рубиновый ОКГ с модулированной добротностью ($\lambda \approx 0,69 \text{ мк}$). Набор светофильтров, калиброванных при низких и высоких мощностях излучения, позволял перекрыть диапазон интенсивности света от 10^{-1} до $5 \cdot 10^6 \text{ вт.см}^{-2}$. Это соответствует максимальной скорости фотогенерации $g \approx 10^{29} \text{ сек}^{-1} \text{ см}^{-3}$ (глубина проникновения света около 3 мк)².

Вначале нами исследовались pn - переходы, полученные диффузией фосфора в Si p - типа. Поверхностная концентрация доноров в этих образцах была одинакова, $n'_n = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а концентрация p_p разная. Освещалась n - область, pn - переход находился на глубине 5-6 мк от поверхности n - слоя. К.р.п. для простоты принималась равной $\frac{kT}{e} \ln \frac{n'_n p_p}{n^2}$. Учет вырождения Si n - типа увеличивает расчетную к.р.п. примерно на 100 мв. Типичная для диффузионных образцов зависимость фотоздс от интенсивности света показана на рис. 1 (кривая № 1). Соответствующая к.р.п. обозначена на рисунке короткой горизонтальной линией. Кривая № 1 - диффузионный pn - переход ($p_p = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n'_n = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), $t_u \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$, освещается n - область. Кривая № 2 - мелкий pn - переход, полученный ионной бомбардировкой ($p_p = 1,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n'_n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$): а- $t_u \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$; б- $t_u \approx 10^{-3} \text{ сек}$, освещается n - область; в- $t_u \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$. pn - переход освещается с торца. На рис. 2 приведена зависимость максимальных значений фотоздс ($U_{\text{макс}}$) от концентрации p_p исходного материала (кривая 1). Видно, что $U_{\text{макс}}$ коррелирует с вычисленными к.р.п. (кривая 2), но значительно меньше их (диффузионные pn - переходы $n'_n = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Поскольку распределение доноров в n - области диффузионного pn - перехода крайне неоднородно, "дефицит в фотоздс" может указывать на то, что часть потенциального барьера n - области, обусловленная этой неоднородностью, не снимается.

Поэтому были проведены дополнительные опыты с мелким pn - переходом, полученным бомбардировкой кремния p - типа ионами фос-

фора с последующим отжигом радиационных дефектов [4]. В этом случае p_n - переход был расположен на глубине ~ 1 мк от поверхности, и

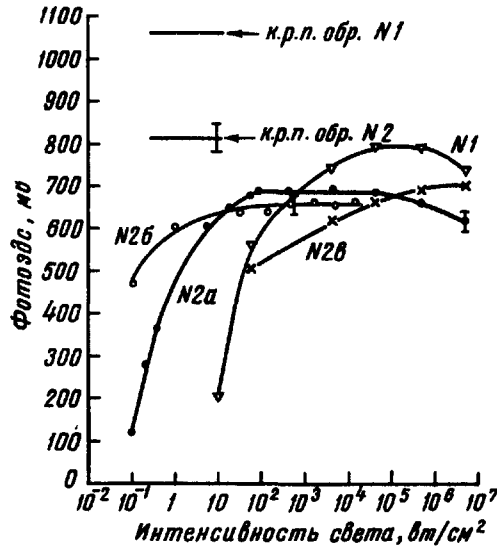


Рис. 1. Зависимость фотоздс от интенсивности света

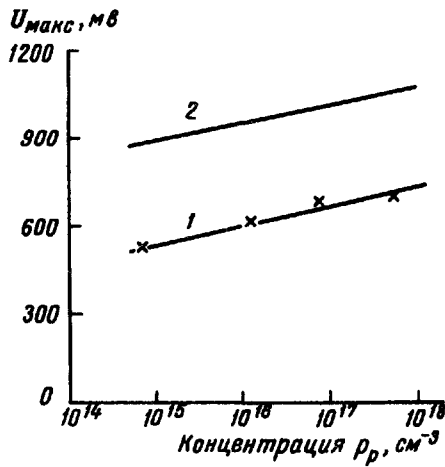


Рис. 2. Зависимость максимальной фотоздс (1) и расчетной к.р.п. (2) от концентрации p_p

распределение доноров сравнительно однородно, при этом $n_n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, вырождения нет. На рис. 1 показана фотоздс этого образца при освещении n -области (кривая № 2 а).

Возбуждающий импульс имел малую длительность ($t_u \approx 5 \cdot 10^{-8}$ сек), это объясняет необычный ход кривых № 1 и 2 а в области малых интенсивностей света (большой наклон, малая величина фотоздс). Однако в условиях насыщения фотоздс не зависит от длительности импульса, на что указывает кривая № 2 б, полученная при возбуждении с помощью ОКГ без модуляции добротности, когда $t_u \approx 10^{-3}$ сек.

Результаты измерений позволяют сделать следующие выводы.

1. С увеличением интенсивности света э.д.с. стремится к насыщению. Тенденция к насыщению начинается с интенсивностей порядка 1 вт. см^{-2} в "стационарном" случае (кривая № 2 б). Этого и следовало ожидать, поскольку нарушается условие $(\Delta n)_p \ll \rho_p$. Действительно, если сделать грубую оценку, считая, что время жизни электронов в p -области $\tau_n \approx 10^{-6}$ сек, получим $\Delta n \cdot \tau_n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (здесь $g \approx 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ см}^{-1}$).

2. Насыщение фотоздс имеет место на протяжении нескольких порядков величины мощности излучения. Спад э.д.с. в области наибольших интенсивностей света обусловлен, по-видимому, возникновением э.д.с. Дембера, противоположной по знаку, так как при облучении p - N -перехода с торца (кривая № 2 в) спада фотоздс не наблюдается.

3. Ни в одном случае предельные фотоздс не совпадали с вычисленными значениями к.р.п., а были всегда меньше их. По-видимому, часть потенциального барьера p - n -перехода не снимается даже при максимальной фотогенерации. Этот вопрос в настоящее время выясняется, однако ясно, что измерение фотоздс насыщения не может служить методом определения к.р.п. в кремниевых p - n -переходах.

Авторы благодарны чл.-корр. АН СССР Б.М.Вулу и В.Д.Егорову за весьма полезные замечания, а также Н.М.Бординой и В.В.Титову за предоставление образцов кремния с p - n -переходами.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступило в редакцию

7 марта 1966 г.

Литература

- [1] R.L.Cummerow. Phys.Rev., 95, 16, 1959.
- [2] P.N.Keating. J.Appl. Phys., 36, 564, 1965.
- [3] D.Girton. Proc. IEEE, 51, 938, 1963.
- [4] В.М.Гусев, М.И.Гусева, В.С.Золотарев, В.И.Куринный, В.Г.Науменко, В.В.Титов, В.С.Цыпленков. Препринт Ин-та атомной энергии им. И.В.Курчатова, ИАЭ-1020, 1965.

1) n_n и p_p - равновесные концентрации электронов в n -области и дырок в p -области; Δn и Δp - приращение концентрации за счет неравновесных носителей.

2) Увеличение интенсивности света до $5 \cdot 10^7$ вт см⁻² путем фокусировки приводило к разрушению поверхности образцов.