

©1994 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ. ЛОКАЛЬНЫЕ УРОВНИ В ПОЛОСЕ ЭНЕРГИЙ $E_c - 0.3 \div 0.5$ эВ

С.Е.Мальханов

Технический университет, 195251, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 7 октября 1993 г. Принята к печати 10 марта 1994 г.)

Спектр энергетических уровней радиационных дефектов (РД) в кремнии может варьироваться в зависимости от вида, дозы и интенсивности облучения. Различные экспериментальные методики также по разному чувствительны к РД, например, с учетом их сечений фото- и термоионизации. В частности, неоднозначны литературные данные по спектру энергетических уровней в диапазоне $E_c - 0.3 \div 0.5$ эВ запрещенной зоны в облученном кремнии [1-7].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований РД в кремнии, облученном электронами с энергиями 4÷8 МэВ. Для исследования использованы методы термостимулированной емкости (ТСЕ), изотермических релаксаций емкости (ИРЕ), фотопроводимости (ФП), фотоемкости (ФЕ), а также изохронный отжиг образцов.

Образцы для исследования представляют собой структуры с $p^+ - n$ - либо $n^+ - p$ -переходами из кремния КЭФ 1.0, 7.5, 300 и КДБ-10. Дозы облучения электронами менялись в диапазоне $10^{13} - 6 \cdot 10^{15}$ см⁻², интенсивности — $10^{12} - 10^{13}$ см⁻² · с⁻¹. Облучение проведено на ускорителе ЛУЭ-8.

p-кремний. Спектр ФЕ кремния КДБ-10, облученного электронами с энергией 4.5 МэВ, включает ступени с энергиями 0.35, 0.42 и 0.5 эВ. Методами ИРЕ обнаружен уровень $E_v + 0.34$ эВ. Данный спектр хорошо согласуется со спектром, приведенным в [1], где облучение кремния проводилось электронами с энергиями 1 и 15 МэВ. Уровень 0.35 (0.34 эВ по ИРЕ), по-видимому, соответствует К-центру, его выход составляет 0.1 см⁻¹.

n-кремний. На рис. 1 представлен участок спектра ФЕ кремния КЭФ 1.0, облученного электронами с энергией 7 МэВ. Данный участок

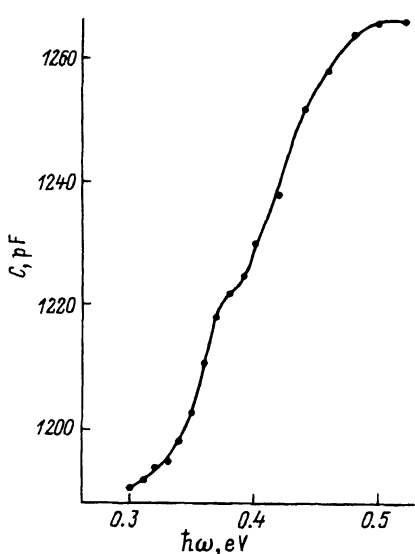


Рис. 1. Участок спектра ФЭ образца из кремния КЭФ 1.0, облученного электронами с энергией 7 МэВ.

представляется в виде двух ступеней ФЭ с энергиями 0.36 и 0.44 эВ. На тех же образцах также были проведены измерения ТСЕ и ИРЕ. С применением этих методов обнаружены уровни $E_c - 0.4, 0.1$ и 0.16 эВ. Несовпадение спектров энергетических уровней, полученных термо- и фотометодами в данной работе, может быть объяснено, например, близостью времен термической перезарядки двух уровней. Мелкие уровни (0.16 и 0.1 эВ), наблюдаемые методом ТСЕ, перезаряжаются при актуальных температурах за очень короткие времена, что не позволяет их фиксировать фотометодами. Уровень $E_c - 0.16$ эВ, по-видимому, принадлежит А-центру. Идентификация остальных уровней затруднительна. Можно предположить, что данные РД имеют вакансионно-кислородный состав, так как в работе исследовался кремний, выращенный по методу Чохральского.

Анализ литературных данных по облученному *n*-кремнию, а также подвергнутому высокотемпературной обработке (везде методами НСГУ) показывает, что при γ -облучении ^{60}Co обнаруживается уро-

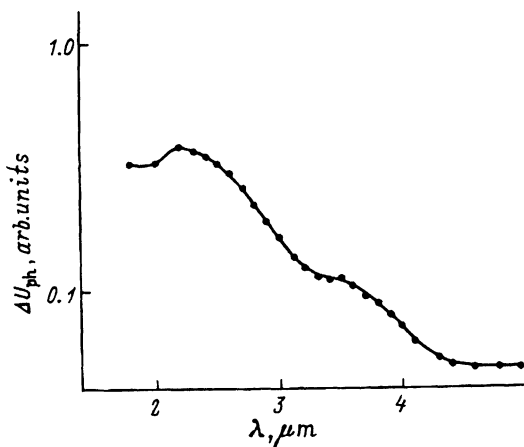


Рис. 2. Участок спектра ФП образца из кремния КЭФ 7.5, облученного электронами с энергией 7.5 МэВ.

вень $E_c - 0.41$ (эффективная энергия активации, обусловленная дефектами с уровнями $E_c - 0.39$ и $E_c - 0.43$ эВ) [2] и локальный уровень $E_c - 0.49$ эВ [3]. При облучении электронами приводятся локальные уровни в запрещенной зоне кремния — 0.42 [4] и 0.4 эВ [5]. При высокотемпературном отжиге обнаружена полоса $0.39-0.46$ эВ [6]. Согласно результатам работы [7], в которой кремний облучался γ -лучами и электронами, в первом случае обнаружен уровень $E_c - 0.49$ эВ, а во втором — локальный уровень $E_c - 0.4$ эВ.

По нашим данным, термометодом обнаруживается локальный уровень $E_c - 0.4$ эВ, что хорошо согласуется со всеми результатами в случае облучения электронами. Кроме ФЭ, нами были проведены также измерения ФП на образце КЭФ 7.5, облученном электронами с энергией 7.5 МэВ. Участок спектра ФП представлен на рис. 2. Как следует из рисунка, фоточувствительность присутствует в той же области спектра, что и обнаруженная методом ФЭ. По рис. 2 нельзя указать положение энергетических уровней, однако очевидно, что присутствуют два крыла ФП, граница между которыми проходит по $\lambda = 3.2$ мкм (0.4 эВ). Заметим, что данная полоса фоточувствительности в наших образцах отжигается целиком при 400°C .

Таким образом, совместные измерения ФП, обладающей свойством обратного захвата носителя и ФЭ, не имеющей обратного захвата, позволяют утверждать наличие двух локальных энергетических уровней 0.36 и 0.44 эВ в исследуемой полосе фоточувствительности кремния, облученного электронами. То, что эти уровни отжигаются вместе, может указывать на принадлежность их одному центру.

Список литературы

- [1] С.Е. Мальханов. Автореф. канд. дис. (Л., ЛПИ 1986).
- [2] П.В. Кучинский, В.М. Ломако, Л.Н. Шахлевич. ФТП, **21**, 1471 (1987).
- [3] Л.С. Берман, В.Б. Воронков, А.Д. Ременюк, М.Г. Толстобров. ФТП, **21**, 140 (1987).
- [4] O.O. Awadelkarim, V. Monemar. J. Appl. Phys., **65**, 4779 (1989).
- [5] В.В. Болотов, А.В. Карпов, В.А. Стручинский. ФТП, **22**, 49 (1988).
- [6] S. Matsumoto, H. Konoco, T. Sasao. Mater. Sci. Forum., **10-12**, 1003 (1986).
- [7] П.Ф. Клингер, В.И. Фистуль. ФТП, **24**, 1118 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Energy Levels in Silicon Irradiated with Fast Electrons. Local Levels in the Energy Band $E_c - 0.3 \div 0.5$ eV

S.E. Malkhanov

The Technological University, 195251, St.-Petersburg, Russia