

Долговременные релаксации фотопроводимости, обусловленные радиационными дефектами в *p*-Si

© С.Е. Мальханов

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 июля 1998 г. Принята к печати 14 октября 1998 г.)

На основе представлений об уровнях прилипания проанализированы данные по релаксации фотопроводимости, связанной с одним из радиационных дефектов в *p*-кремнии, используемом в радиационной технологии. Исследовались дефекты, образованные дивакансиями в положительном зарядовом состоянии (W^+), $\lambda = 4$ мкм. Показано, что этот дефект является уровнем прилипания по отношению к более глубоким уровням радиационных дефектов, например *K*-центру (что ярко проявляется после предварительной коротковолновой подсветки). В результате в фотопроводимости проявляются процессы с малыми временами релаксации. Показано также, что либо увеличение энергии электронов, используемых для введения данного радиационного дефекта до величины 15 МэВ, либо увеличение интенсивности облучения электронами с энергией 1 МэВ позволяет получить короткие релаксации фотопроводимости в данном материале.

Исследования релаксации фотопроводимости (ФП) необходимы, например, при разработке фотоприемников, а также приборов, для которых актуальна быстрая рекомбинация носителей заряда [1–3]. В данной работе представлены результаты исследований долговременной релаксации ФП в кремнии марки КДБ-10, облученном электронами с энергиями 1, 15 МэВ и γ -квантами ^{60}Co .

Образцы для исследования представляли собой прямоугольные параллелепипеды размерами $5 \times 2 \times 0.2$ мм³. Омические контакты создавались путем последовательного напыления и термокомпрессии алюминия по краям плоской грани. Облучение электронами с энергией 15 МэВ проводилось на линейном ускорителе электронов дозами до 10^{16} см⁻², электронами с энергией 1 МэВ — на ускорителе типа РТЭ-1В, интенсивность облучения при этом варьировалась в пределах $10^{13} - 10^{14}$ см⁻² · с⁻¹. Компенсация кремния радиационными дефектами (РД) для наблюдения ФП была близка к единице (концентрация *K*-центров — основной компенсирующей РД примеси может быть оценена по порядку величины как 10^{15} см⁻³, а концентрация РД, определяющих долговременные релаксации — на порядок меньше). Исследования фотопроводимости проводились на инфракрасном спектрометре ИКС-21 с призмой из NaCl. Пучок света фокусировался на плоскую грань образца в криостате при температуре жидкого азота. Мощность инфракрасного (ИК) излучения, измеряемая экспериментально, составляла на длине волны 4 мкм по порядку величины 10^{-4} Вт/см². При модулировании прямоугольных импульсов света на частоте 20 Гц, время перекрытия щели составляло 0.2 мс.

На рис. 1, *a* показана релаксация фотопроводимости после однократного выключения ИК света на длине волны 3.9 мкм в образце, облученном электронами с энергией 1 МэВ. На рис. 1, *b* показана та же релаксация при периодическом воздействии света с длительностью перекрытия входной щели 0.2 мс. Из анализа рисунка следует, что спад фотопроводимости очень точно соот-

ветствует экспоненциальной зависимости с постоянной времени, равной 1.9 с. Такое поведение может означать, что данная релаксация принадлежит перезарядке одного уровня. Этот уровень (в дальнейшем — ”рабочий”) известен как принадлежащий дивакансии в однократном положительном зарядовом состоянии с характерным сечением фотоионизации резонансного вида и ранее нами наблюдался [4]. (Максимум сечения фотоионизации на длине волны 3.9 мкм составляет для него $4 \cdot 10^{16}$ см²). Если заполнение уровня носителями может происходить

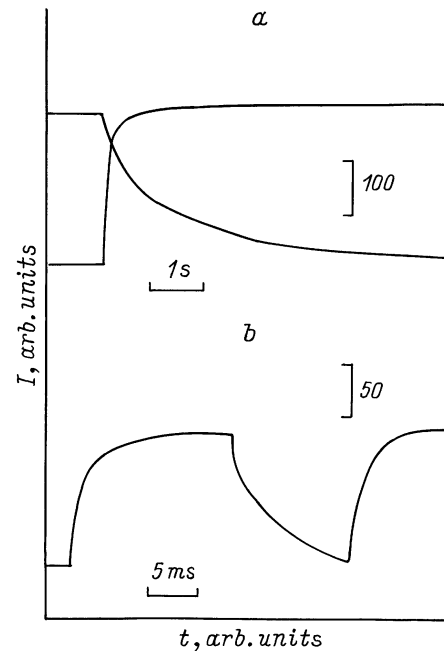


Рис. 1. Кинетика нарастания и спада стационарной фотопроводимости в облученном кремнии ($\lambda = 3.9$ мкм): *a* — единичное включение и выключение света, длительность перекрытия входной щели спектрометра 10 мс; *b* — периодическое воздействие прямоугольными импульсами света, длительность перекрытия входной щели спектрометра 0.2 мс.

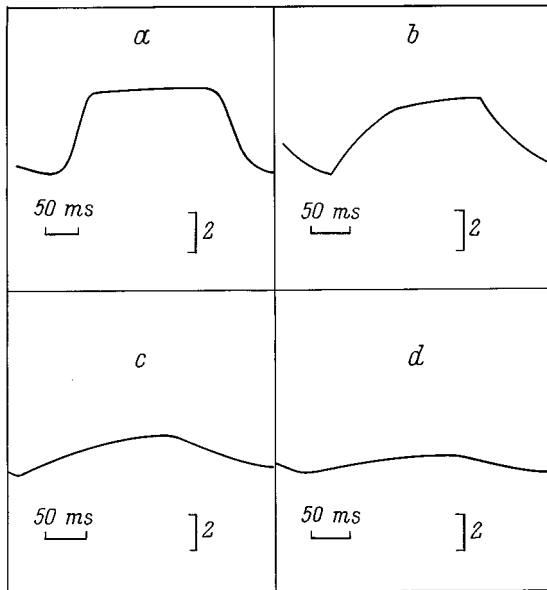


Рис. 2. Кинетика нарастания и спада стационарной ФП в облученном кремнии ($\lambda = 3.9$ мкм) после предварительной подсветки на длине волны $\lambda = 2$ мкм по прошествии после подсветки промежутка времени, с: *a* — 5, *b* — 30, *c* — 100, *d* — 500.

по непростым схемам, то его освобождение от носителей происходит по оптимальному пути с перебросом носителей на край валентной зоны.

На рис. 2 представлены релаксационные кривые фотопроводимости, измеренные на том же образце через разные промежутки времени после предварительного освещения образца ИК светом с длиной волны, соответствующей половине ширины запрещенной зоны кремния. Как это следует из рисунка, такая предварительная подсветка приводит к резкому укорочению заднего фронта релаксационной кривой. Если предположить, согласно [2], что рабочий уровень в этой ситуации оказывается практически целиком заполненным дырками, а процесс релаксации такого стимулированного заполнения рабочего уровня хорошо описывается экспоненциальной зависимостью,¹ то рабочий уровень при этом оказывается уровнем прилипания по отношению к более глубоким уровням (например, к уровню, принадлежащему *K*-центру — РД с самой большой концентрацией). Оценка постоянной времени этого процесса составляет 390 с. При оценке постоянной времени процесса стимулированного заполнения рабочего уровня (см. рис. 2) обнаружены очень короткая (слабо влияющая) и длинная (существенная) релаксация, которая составляет по нашим расчетам 390 с. Неучет короткой составляющей может привести к занижению постоянной времени ре-

лаксации. Иначе говоря, стимулированное заполнение рабочего уровня сохраняется значительное время.

Заметим, что нами ранее были детально исследованы спектры энергетических уровней и отчасти дефектообразование в кремнии, облученном быстрыми электронами [5]. В основном спектры энергетических уровней в кремнии при облучении электронами с энергиями 1, 4–8 и 15 МэВ сходны между собой. Однако по мере уменьшения энергии электронов доля более глубоких уровней возрастает. Такое поведение приводит к тому, что кинетика ФП на длине волны $\lambda = 3.9$ мкм в *p*-Si обнаруживает длинные релаксации фотопроводимости, такие что работа приборов на основе данных РД становится неприемлемой. Применение γ -облучения вообще не позволяет получить рабочий уровень с актуальной концентрацией. Отметим в заключение, что увеличение интенсивности электронного облучения позволяет достигать достаточно малых времен релаксации фотопроводимости. Отметим также, что наш анализ основан на модельных представлениях о механизмах уровней прилипания, описанных, например, в работах [1–3].

Таким образом, присутствие долговременных релаксаций ФП на длине волны $\lambda = 3.9$ мкм практически определяется как величинами энергий электронов, так и интенсивностями электронного облучения кремния *p*-типа проводимости при введении в него актуального спектра энергетических уровней РД.

Список литературы

- [1] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Физматгиз, 1963).
- [2] А. Милнз. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (М., Мир, 1977).
- [3] М.С. Юнусов, М. Каримов, Б.Л. Оксенгендлер. *ФТП*, **32**, 264 (1998).
- [4] Н.В. Колесников, А.А. Лебедев, С.Е. Мальханов. *ФТП*, **13**, 812 (1979).
- [5] С.Е. Мальханов. *Петербургский журнал электроники*, № 3, 16 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Long-time photoconductivity relaxation due to radiation defects in *p*-silicon

S.E. Mal'khanov

St. Petersburg State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

¹ Это действительно имеет место согласно нашему анализу, проведенному путем сравнения экспериментальных зависимостей с теоретическими (кроме начального участка).