

КИНЕТИКА ФОТОПРОВОДИМОСТИ И ПОГЛОЩЕНИЯ В $D^-(A^+)$ -ЗОНЕ ЛЕГИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Я.Е.Покровский, О.И.Смирнова, Н.А.Хвальковский

Институт радиотехники и электроники РАН
103907 Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 июля 1997 г.

Исследованы спектры фотопроводимости и индуцированное поглощение фонового излучения в области энергий 10–40 мэВ в слабо компенсированном кремнии, легированном примесями В, Ga и As при 4.2 К. Показано, что в спектрах РС по $D^-(A^+)$ -зонам наблюдаются провалы, соответствующие фотоионизации долгоживущих возбужденных состояний В и As. Обнаружено, что частотная зависимость спектров РС соответствует временам релаксации возбуждения состояний в $D^-(A^+)$ -зонах порядка 10^{-4} с. Установлено, что в электрических полях $E > 100$ В/см РС резко уменьшается, в то время как индуцированное поглощение фона изменяется незначительно. Это подтверждает заключение о том, что возбуждение самой $D^-(A^+)$ дает основной вклад в РС.

PACS: 72.40.+w, 72.80.Cw

В большой серии работ (см. обзор [1] и последующие ссылки в [2]) было установлено, что в кремнии нейтральные доноры и акцепторы при захвате неравновесных электронов или дырок образуют стабильные электрически заряженные состояния D^- или A^+ , аналогичные отрицательно заряженным ионам водорода. При относительно высоких концентрациях примесей $N > 10^{16}$ см⁻³ и слабой компенсации ($K < 10^{-4}$) эти состояния образуют $D^-(A^+)$ -зоны, оказывающие при низких температурах весьма существенное влияние на фотоэлектрические и оптические свойства кремния. Это влияние проявилось и при исследованиях долгоживущих возбужденных состояний доноров V и акцепторов III групп в кремнии, отщепленных от основного состояния долин-орбитальным или спин-орбитальным взаимодействиями ([3] и ссылки там же). В настоящем сообщении приведены результаты исследований кинетики фотоответа и поглощения в сильно легированном слабо компенсированном ($K < 10^{-4}$) кремнии в области энергий фотонов $h\nu$ 10–40 мэВ при 4.2 К.

На рис.1 представлены спектры фотопроводимости (РС), нормированные на поток фотонов, и коэффициента поглощения (k) кремния, легированного бором, галлием и мышьяком. Спектры зарегистрированы при воздействии на образцы интенсивного фонового излучения комнатной температуры, экранированного лишь холодным кремниевым окном криостата. Эта стационарная фоновая подсветка обеспечивала заселение как $D^-(A^+)$ -состояний, так и глубоких долгоживущих возбужденных состояний примесей бора и мышьяка. Как видно из рис.1, в спектрах поглощения наблюдаются лишь полосы, соответствующие фотоионизации заселенных фоном долгоживущих возбужденных состояний бора и мышьяка. В спектрах РС этому поглощению соответствуют широкие провалы. Отсюда следует, что поглощение за счет ионизации долгоживущих возбужденных состояний существенно превышает поглощение, обусловленное фотоионизацией $D^-(A^+)$ -состояний. В то же время, РС по $D^-(A^+)$ -зоне [2] превышает фотоответ в области энергий, соответствующих ионизации долгоживущих состояний. Как и следовало ожидать, в кремнии с примесью галлия

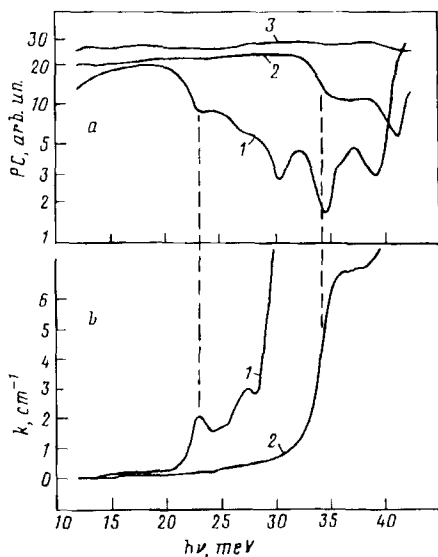


Рис.1. Спектры: *a* – фотопроводимости РС образцов кремния, легированного в концентрациях N (см^{-3}): 1 – В ($3.6 \cdot 10^{16}$); 2 – As ($1.2 \cdot 10^{17}$); 3 – Ga ($3.6 \cdot 10^{16}$); *b* – коэффициент поглощения k в образцах 1 и 2. Пунктиры на рисунке соответствуют энергиям ионизации долгоживущих возбужденных состояний примесей В и As

аналогичных особенностей в спектрах РС и поглощения обнаружить не удалось, поскольку долгоживущие возбужденные состояния этой примеси не могут быть заселены свободными дырками, возбужденными в валентную зону [3].

Доминирующая роль фотопроводимости по $D^-(A^+)$ -зоне, по-видимому, связана с большими временами релаксации возбуждения за счет прыжковых процессов [2]. Для проверки этого предположения была исследована кинетика примесного фотоответа в области 10–70 мЭВ. На рис.2 приведены спектры РС кремния, легированного бором, полученные при различных частотах модуляции f излучения фурье-спектрометра. Видно, что РС уменьшается с ростом частоты, и это уменьшение соответствует постоянной времени порядка 10^{-4} с. Отметим, что частотной зависимости в области энергий, соответствующих ионизации основного состояния примеси, обнаружено не было. Аналогичные частотные зависимости РС наблюдались в кремнии, легированном галлием и мышьяком. При этом в условиях эксперимента интенсивность излучения спектрометра была намного меньше интенсивности стационарной фоновой подсветки. Отсюда следует, что частотная зависимость РС связана с изменением ситуации в самой примесной $D^-(A^+)$ -зоне при ее фотовозбуждении.

Это заключение подтверждается сравнением зависимостей РС и индуцированного поглощения [4] от напряженности электрического поля E в образцах. Влияние электрического поля на спектры РС по A^+ -зоне в кремнии, легированном бором, исследовано в [2]. Аналогичные исследования были выполнены и в настоящей работе. Исследовалось интегральное поглощение теплового фона, индуцированное фотовозбуждением образцов кремния модулированным излучением лазера с длиной волны 3.39 мкм ($h\nu = 366$ мЭВ) [4]. Определенное нами сечение фотоионизации основного состояния атомов бора фотонами такой энергии равно $3 \cdot 10^{-17} \text{см}^2$. Поэтому при толщине образцов кремния 0.1 см обеспечивалось достаточно однородное объемное возбуждение вплоть до $N = 10^{17} \text{см}^{-3}$. Непоглощенная в образце часть возбуждающего излучения полностью задерживалась светофильтром из полиэтилена. Фоновое излучение,

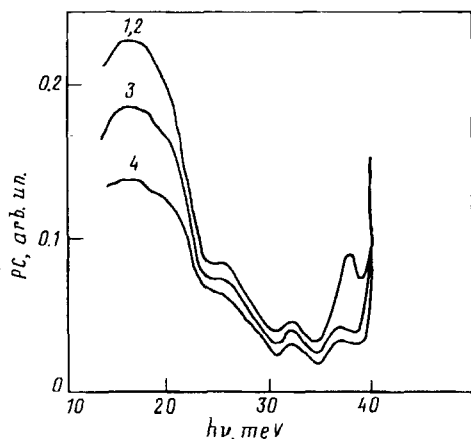


Рис.2. Спектры РС образца 1 кремния, легированного бором, при различной частоте модуляции излучения спектрометра f (Гц): 1 - 170; 2 - 520; 3 - 1050; 4 - 2000

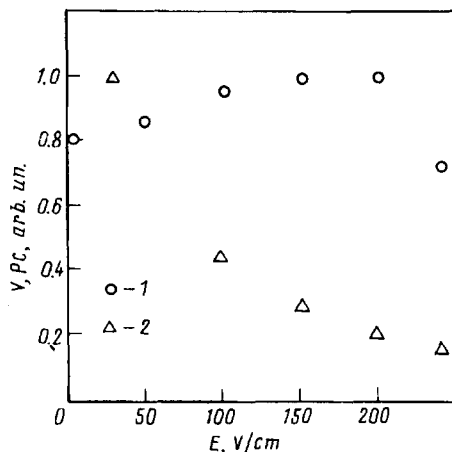


Рис.3. Зависимости от напряженности электрического поля E в образце 1 кремния, легированного В: 1 - индуцированного поглощения V ; 2 - РС

прошедшее через образец и фильтр, попадало на фотосопротивление из германия, легированного галлием или сурьмой, с высокой чувствительностью в области энергий 10–40 мэВ. Переменная часть ответа фотосопротивления V была пропорциональна поглощению фона, вызванному возбуждением образца модулированным излучением лазера. Спектр и интенсивность фонового излучения можно было изменять, помещая перед образцом охлаждаемые фильтры из кристаллического или плавленого кварца, прозрачные для лазерного пучка, но практически не пропускавшие фоновое излучение с энергиями фотонов более 40 и 15 мэВ, соответственно.

На рис.3 приведена зависимость величины РС от напряженности электрического поля E в кремнии, легированном бором, при $h\nu = 20$ мэВ. При построении этой зависимости уравнивались величины фотоответов в различных полях при энергиях, соответствовавших фотовозбуждению дырок из основного состояния в валентную зону. На том же рисунке приведена зависимость от E величины индуцированного поглощения для того же образца и в аналогичных фоновых условиях. Из рисунка видно, что поглощение изменяется незначительно при возрастании E . Индуцированное поглощение может быть связано с модуляцией заселенности как долгоживущих возбужденных состояний [4], так и A^+ -зоны, причем оба эти явления характеризуются медленной релаксацией. В то же время РС резко уменьшается при возрастании E . Зависимость РС от E объяснена в [2] делокализацией ионизованных пар примесных атомов $A^+ - A^-$ и изменением эффективной прыжковой подвижности в A^+ -зоне. Отсутствие сильной зависимости поглощения от E в наших экспериментах не противоречит такому заключению, даже если в слабо компенсированном кремнии индуцированное поглощение связано в основном с A^+ -состояниями. Действительно, вероятность ионизации A^+ -центров определяется их концентрацией, но не подвижностью. Наблюдавшаяся нами зависимость РС от E отличается от

установленной в [2], что может быть связано с различной интенсивностью фонового возбуждения.

Приведенные результаты показывают, что в сильно легированном слабо компенсированном кремнии одновременно проявляются как $D^-(A^+)$, так и долгоживущие возбужденные состояния простых доноров и акцепторов, и необходимо учитывать их взаимное влияние. Возможно, что долгоживущие возбужденные состояния играют существенную роль в релаксационных процессах, протекающих в $D^-(A^+)$ -зонах [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-16243).

-
1. Е.М.Гершензон, А.П.Мельников, Р.И.Рабинович, Н.А.Серебрякова, УФН **132**, 353 (1980).
 2. А.П.Мельников, Ю.А.Гуревич, Л.Н.Шестаков, Е.М.Гершензон, Письма в ЖЭТФ **63**, 89 (1996).
 3. Я.Е.Покровский, О.И.Смирнова, Н.А.Хвальковский. ЖЭТФ **112**, 221 (1997).
 4. Ya.E.Pokrovskii, O.I.Smirnova, and N.A.Khvalkovskii, Solid State Comm. **93**, 405 (1995).