

МЕДЛЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АКЦЕПТОРОВ В КРЕМНИИ

Я.Е.Покровский. О.И.Смирнова

*Институт радиотехники и электроники АН СССР
103109, Москва*

Поступила в редакцию 25 июня 1991 г.

В кремнии, легированном индием и бором, обнаружено рекомбинационное излучение, возникающее в области 30 - 100 мкм при низких температурах и примесном фотовозбуждении и его длинновременная релаксация. В кремнии, легированном индием, обнаружена также медленная релаксация поглощения излучения в области 6 - 10 мкм. Эти оптические эксперименты подтверждают существование долгоживущих возбужденных состояний акцепторов в кремнии.

В работах ^{1,2} была обнаружена медленная ($\sim 10^{-5}$ с) релаксация примесного фотоотклика кремния, легированного рядом примесей III и V групп в концентрации более 10^{16} см⁻³, при микроволновом (8 мм) напряжении смещения. Это явление было объяснено существованием долгоживущих возбужденных состояний примесей, обеспечивающих при низких температурах преобладание прыжковой фотопроводимости в высокочастотном электрическом поле ². В настоящей работе приведены результаты оптических экспериментов, подтверждающие существование долгоживущих возбужденных состояний примесей индия и бора в кремнии.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Исследуемый образец 1 кремния возбуждался излучением лазера, модулированным с частотой f 40 - 10^5 Гц. Для эффективного возбуждения примеси индия использовалось излучение с длиной волны 3,39 мкм, примеси бора - 10,6 мкм, которое вводилось в криостат через окна 2 или 3 из кристаллического кварца или германия. Возникающее при этом излучение или модуляция поглощения фонового излучения комнатной температуры, проходящего через образец, регистрировалось фотоспротивлением 4 из германия, легированного сурьмой или ртутью ³. Перед фотоспротивлением размещался светофильтр 5 из полиэтиленовой пленки для защиты от возбуждающего излучения 3,39 мкм или карбида кремния - для защиты от излучения 10,6 мкм. Светофильтры 6 из различных материалов с различными областями прозрачности ⁴ служили для выделения спектральных областей излучений, действовавших на фотоспротивление. Исследуемый образец, фотоспротивление и светофильтры размещались в металлическом экране 7 с окнами для возбуждающего, рекомбинационного и фонового излучений, погруженном в жидкий гелий. Исследовались зависимость переменной составляющей отклика фотоспротивления от интенсивности и частоты модуляции возбуждающего излучения, спектрального состава регистрируемого и фонового излучения, выделявшегося фильтром 6.

Было обнаружено, что при интенсивности примесного возбуждения 5 - 50 мВт образцов кремния, легированных как индием, так и бором, возникает отклик фотоспротивления из германия, легированного сурьмой, на 3 - 4 порядка превышающей уровень шумов. Величина отклика практически не зависела от присутствия или отсутствия фонового излучения, попадавшего на фотоспротивление после прохождения сквозь исследуемый образец. Отсюда можно заключить, что отклик определялся рекомбинационным излучением, а

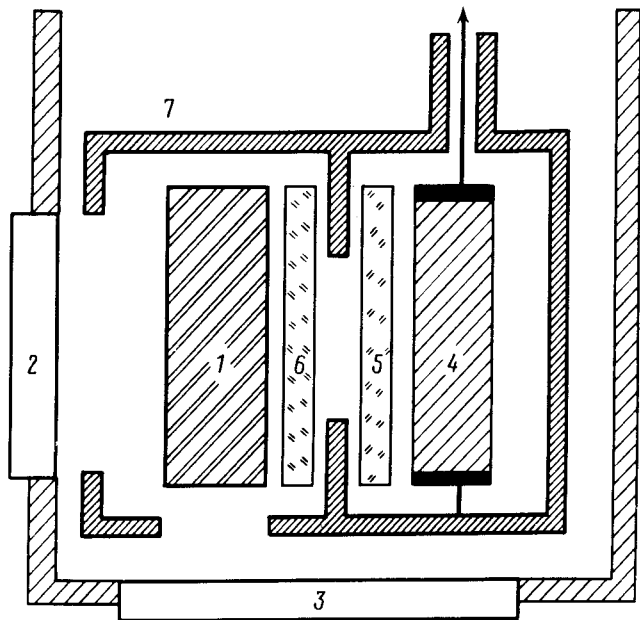


Рис. 1. Схема эксперимента

не модуляцией поглощения фонового излучения. Германий, легированный сурьмой, обладает высокой фоточувствительностью в области 50 - 100 мкм. Фильтр из кристаллического кварца, непрозрачного в области 6 - 35 мкм, уменьшал величину отклика лишь на 10%, фильтр из плавленого кварца с полосой поглощения 6 - 80 мкм уменьшал отклик в 10 раз, а фильтр из КРС - 6 раз, прозрачный до 30 мкм, практически не пропускал рекомбинационное излучение. Отсюда следует, что рекомбинационное излучение лежит в длинноволновой области спектра, и во всяком случае его длина волны превышает 30 мкм, т.е. энергия фотонов менее 40 мэВ. Эта энергия заведомо меньше энергии возбуждения дырки из основного состояния примеси индия в любое из возбужденных состояний "серии $P_{3/2}$ ", в том числе и наинизшего из них (142 мэВ, ⁵). Таким образом, по крайней мере в случае индия длинноволновое излучение возникает в результате переходов дырок между возбужденными состояниями.

Фотосопротивление из германия, легированного ртутью, обладает высокой чувствительностью в спектральной области до 12 мкм. Фотоотклик на этом приемнике возникал лишь в том случае, когда сквозь образец 1 кремния, легированного индием, через германиевое окно 2 проходило фоновое излучение комнатной температуры, попадавшее затем на приемник. Примесное возбуждение при этом производилось обычно через кварцевое окно 3. Если окно 2 было из кристаллического кварца, непрозрачного в области 6 - 12 мкм, фотоотклик зарегистрировать не удавалось. Отсюда следует, что переменный сигнал, регистрировавшийся фотосопротивлением из германия с ртутью, возникал вследствие модуляции интенсивности фонового излучения, проходившего на приемник через образец кремния с индием при его примесном возбуждении. Спектральная область, в которой в этом случае наблюдался фотоотклик, соответствует энергиям перехода дырок из основного состояния примеси индия в возбужденные состояния "серии $P_{3/2}$ " ⁵. Модуляция интенсивности фона может возникать при этом за счет частичного опустошения основного состояния, которое оказывается значительным благодаря локализации

неравновесных дырок в процессе каскадного захвата на одном из долгоживущих возбужденных состояний примеси индия ^{1,2}.

Это заключение подтверждается зависимостью величины фотоотклика на излучение и поглощение кремния, легированного индием, от частоты модуляции возбуждающего излучения (рис. 2). Из рисунка видно, что как кинетика фотоотклика образцов с различным содержанием индия при микроволновом смещении, так и кинетика затухания рекомбинационного излучения и релаксация модуляции поглощения определяются длинновременными процессами. Время релаксации $\sim 10^{-5}$ с наиболее быстрого процесса - микроволнового фотоотклика - по крайней мере на три порядка больше времени жизни $\sim 10^{-8}$ с свободных фотодырок в этих образцах. Наибольшее время релаксации $\sim 10^{-3}$ с проявляется в модуляции поглощения фонового излучения. Как уже отмечалось, это поглощение лежит в спектральной области 100 - 200 мэВ. Эта область соответствует возбуждению дырок из основного состояния примеси индия, время равновесного заполнения которого должно определяться наибольшим временем жизни дырок на возбужденных состояниях. Различие же в кинетике высокочастотной прыжковой проводимости, рекомбинационного излучения и поглощения может быть связано с тем, что в этих процессах основную роль играют разные возбужденные состояния с различным временем жизни дырок на них.

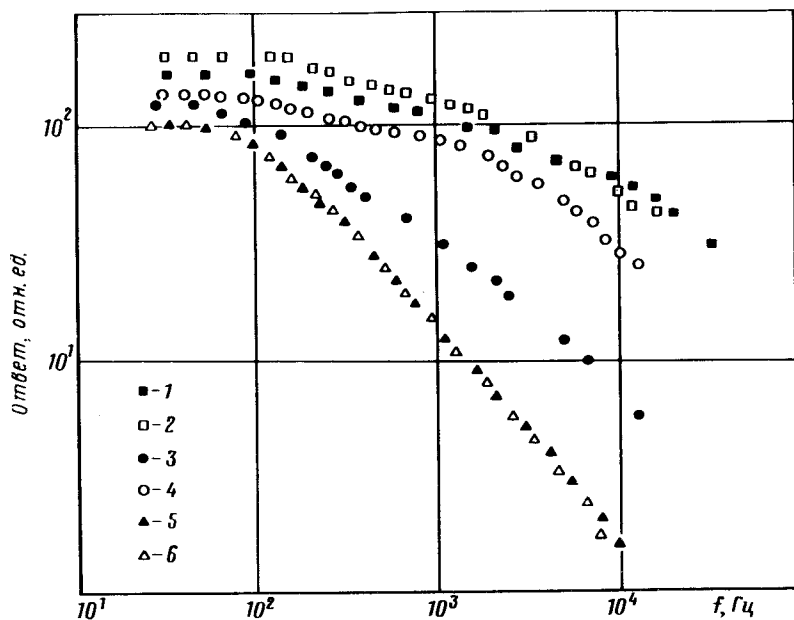


рис. 2. Зависимость от частоты модуляции f возбуждающего излучения 1,2 - фотоотклика при микроволновом смещении; 3,4 - интенсивности рекомбинационного излучения; 5,6 - глубины модуляции поглощения для кремния, легированного индием в концентрации 1, 3, 5 - $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2, 4, 6 - $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Частотная зависимость фотоотклика кремния, легированного бором, при микроволновом смещении и отклика фотосопротивления из германия с сурьмой на длинноволновое рекомбинационное излучение представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что эти зависимости при возбуждении лазером 10,6 мкм практически совпадают, а время релаксации близко к 10^{-5} с и не зависит от концентрации компенсирующих доноров в исследованных образцах. Длинноволновое рекомбинационное излучение со сходной кинетикой наблюдалось и из образцов кремния, легированного бором в концентрациях менее 10^{16} см^{-3}

и исчезало лишь в области концентраций около 10^{14}см^{-3} вследствие незначительности поглощения возбуждающего излучения. Отсюда следует, что рекомбинационное излучение возникает в результате внутрицентровых переходов дырок и не связано с коллективными свойствами примесей в кремнии. Медленная же релаксация фотопроводимости при микроволновом смещении проявлялась лишь при концентрации бора, превышавшей 10^{16}см^{-3} , что является одним из подтверждений прыжковой природы этой проводимости.

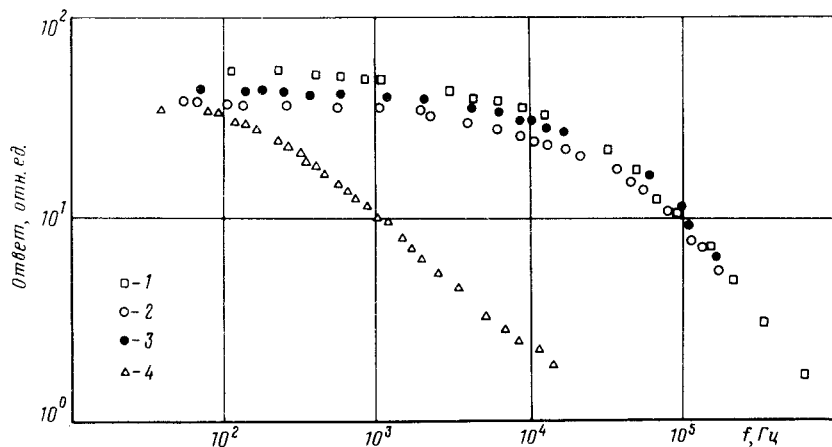


Рис. 3. Зависимость от частоты модуляции f возбуждающего излучения с длиной волны 1, 2, 3 - 10,6 мкм, 4 - 3,39 мкм: 1 - фотоотклика при микроволновом смещении; 2, 3, 4 - интенсивности рекомбинационного излучения для кремния, легированного бором в концентрации $3,6 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ и концентрацией доноров 1, 3, 4 - $5 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$; 2 - $5 \cdot 10^{12} \text{см}^{-3}$

Для определения энергетического положения и физической природы долгоживущих возбужденных состояний акцепторов в кремнии необходим спектральный анализ длинноволнового рекомбинационного излучения, что достаточно сложно вследствие его малой интенсивности. Здесь возможно проявление состояний "серии $P_{1/2}$ ", связанных с ветвью валентной зоны кремния, отщепленной спин-орбитальным взаимодействием на 43 мэВ⁵. Косвенным подтверждением этого предположения нам представляется влияние энергии фотонов возбуждающего излучения на кинетику рекомбинационного излучения. Действительно, из рис. 3 видно, что при возбуждении кремния, легированного бором, излучением 3,39 мкм (366 мэВ) время релаксации возрастает до 10^{-3} с, т.е. на два порядка больше времени релаксации при возбуждении излучением 10,6 мкм (117 мэВ). Эти энергии много больше энергии ионизации примеси бора (45,7 мэВ⁵) и дырки возбуждаются в обоих случаях глубоко в валентную зону. Однако релаксация их энергии и последующий захват с участием оптических фононов может привести к локализации дырок на различных возбужденных состояниях примеси бора с различным временем жизни.

1. Покровский Я.Е., Смирнова О.И. Письма в ЖЭТФ, 1990, 51, 377.
2. Pokrovskii Ya.E., Smirnova O.I. Materials Science Forum, 1990, 65, 66. Shallow Impurities in Semiconductors, 271, Zurich.
3. Шоль Ш. и др. Приемники инфракрасного излучения, 1969, Москва.
4. Воронкова Е.М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. 1965, Москва
5. Ramdas A.K., Rodrigues S. Rep. Progr. Phys., 1981, 44, 1287.