

ПО ИТОГАМ ПРОЕКТОВ
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Проекты РФФИ # 93-02-2070, # 96-02-16243, # 99-02-16078 и # 02-02-16272

Примесные пары и релаксация возбуждения в легированном кремнии

Я. Е. Покровский¹⁾, Н. А. Хвальковский

Институт радиотехники и электроники РАН, 125009, Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 апреля 2004 г.

В кремнии, легированном В, Al, Ga, In, P, As, Sb в концентрациях 10^{16} – 10^{18} см⁻³ при 4.2 и 10.5 К, исследована кинетика фотопроводимости в 8-миллиметровом микроволновом электрическом поле при примесном импульсном возбуждении. Установлено, что инфракрасное поглощение парами примесей и медленная компонента релаксации фотоответа возникают при близких концентрациях примесей. Показано, что эта компонента обусловлена возрастанием поляризационной прыжковой проводимости при оптической перезарядке примесных состояний – изолированных примесей, примесных пар и диполей (пар ионов основной и компенсирующей примесей). Проанализированы процессы прыжкового переноса заряда ионов в процессе релаксации. Показано, что основной вклад в поляризационную фотопроводимость при относительно небольших концентрациях дают прыжковые переходы в примесных парах, а при возрастании концентраций – прыжки с участием изолированных ионов.

PACS: 71.55.Cn, 72.40.+w

1. Поляризационная прыжковая фотопроводимость. Первоначальной целью работы, начатой в 1987 г, было создание бесконтактного метода измерения времени релаксации примесного фотоответа кремния, легированного элементами III и V групп в концентрациях $N > 10^{16}$ см⁻³. Для этого исследовались зависимости фазы и амплитуды фотоответа образцов от частоты модуляции f возбуждающего излучения при постоянном и микроволновом (МКВ, МСВ) напряжениях смещения [1]. Время релаксации фотоответа в постоянном электрическом поле при 20 К не превышало 10^{-7} с и уменьшалось на 2–3 порядка при понижении температуры и увеличении концентрации компенсирующей примеси N_c . Такие же времена релаксации фотоответа $U_{МСВ}$ в микроволновом поле и их зависимости от температуры и компенсации были установлены при $f > 1$ МГц, то есть в обоих случаях процесс определялся каскадным захватом свободных носителей заряда на ионизованные примеси [2]. Однако в [3, 4] было обнаружено, что при температурах $T < 20$ К в МКВ поле проявляется не только быстрая, но и медленная компонента фотоответа $U_{МСВ}$. Время релаксации этой компо-

ненты, оцененное по зависимости ответа от f , оказалось порядка 10^{-5} с при 5 К. При низкочастотном ($f \sim 1000$ Гц) возбуждении $U_{МСВ}$ возрастал как при понижении T , так и при возрастании N и N_c . При 5 К отношение МКВ ответов при низкочастотном и высокочастотном возбуждении достигало почти трех порядков [4]. Аналогичные закономерности были установлены при исследовании германия с As [5] и фосфида галлия с Te [6]. Таким образом, медленная релаксация примесного фотоответа в легированных полупроводниках проявлялась лишь в МКВ электрическом поле. Отсюда следовало, что это явление связано с прыжковой фотопроводимостью (ФП). Здесь имеется полная аналогия с работой [7], в которой исследована прыжковая проводимость σ легированного кремния в переменном электрическом поле. Прыжки носителей заряда между нейтральными и ионизованными примесями, индуцированные переменным полем, изменяют расстояния между ионами основной и компенсирующей примесей, то есть изменяют дипольные моменты. Такая проводимость является поляризационной и даже при низких частотах на несколько порядков превышает перколяционную проводимость. Предполагалось, что возбуждение может изменять прыжковую проводимость полупроводника вследст-

¹⁾e-mail: yaep@mail.cplire.ru

вие накопления носителей заряда в долгоживущих возбужденных $1S$ состояниях примесей с большими орбиталями. Оптические переходы между этими состояниями и основным состоянием $1S$ запрещены в дипольном приближении. Сечение фотовозбуждения носителей заряда при таких переходах в кремнии не превышает 10^{-18} см² [8], что соответствует излучательному времени жизни порядка 1 с. Это предположение подтверждалось также и тем, что в кремнии, легированном Вi и Ga при $N \sim 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³, медленная релаксация U_{MCW} не проявлялась [3, 4]. Примеси Вi, Ga и Al имеют высокие возбужденные состояния, энергии которых близки к энергиям оптических фононов [9]. Поэтому захваченный носитель заряда из этих более высоких состояний может быстро релаксировать в основное состояние, минуя возбужденные $1S$ -состояния. Ряд экспериментальных результатов [10] согласовался с моделью МКВ ФП с участием долгоживущих возбужденных состояний примесей, развитой в [11]. Однако некоторые эксперименты противоречили такой интерпретации. Так, уменьшение интенсивности возбуждения привело к росту времени релаксации U_{MCW} от 10 мкс в [3, 4], до 500 мкс в [10]. Учет образования D^- - или A^+ -центров [12] не позволил объяснить столь сильную зависимость скорости релаксации от условий возбуждения. Далее, было установлено, что в кремнии, легированном Ga и Al, также проявляется медленная релаксация U_{MCW} , если $N > 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Наконец, оценки вероятности переходов с эмиссией акустических фононов [4] показали, что времена жизни возбужденных $1S$ состояний в кремнии не превышают 10^{-10} с. По этим причинам был развит новый подход к проблеме поляризационной фотопроводимости легированного кремния [13–15].

2. Пары примесей. Подход основан на учете взаимодействия примесей. В отличие от быстро диффундирующих примесей, образующих ближние пары, примеси III и V групп распределены случайно в узлах кристаллической решетки кремния. В последнем случае нет четкой границы между парами и изолированными примесями. Однако можно выделить группу примесей, которая должна играть основную роль в прыжковой поляризационной ФП. Поясним ситуацию, исходя из простейшего аналога — системы из двух протонов и двух электронов. Эта известная картина одноэлектронных термов молекулы водорода представлена на рис.1 [16]. Здесь разности энергий между штриховыми и сплошными линиями соответствуют уменьшению энергий E ионизации и возбуждения электрона в $2S$ -состояние по сравнению с энергиями для удаленных протонов. Видно, что области

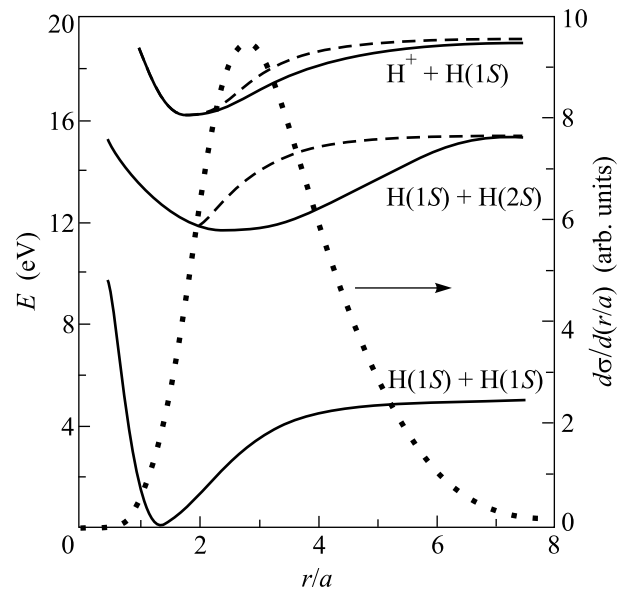


Рис.1. Одноэлектронные термы молекулы водорода (r – расстояние между протонами, a – боровский радиус). Разности между сплошными и штриховыми линиями соответствуют уменьшению энергий E ионизации и возбуждению относительно изолированных атомов ($r = \infty$). Точки – относительный вклад электронного перехода между нейтральным и ионизованным атомами в проводимость σ , вызванный 8-миллиметровым электрическим полем [7]

существенного уменьшения энергий соответствуют расстояниям $r \approx (2 - 5) \cdot a$, где a – боровский радиус. При этом энергия нейтральной, и ионизованной “молекул” ниже, чем у изолированных атома и иона водорода. Аналогичная ситуация должна иметь место и в случае примесных пар в кристаллах [17], но в иных масштабах расстояний и энергий, зависящих от величины боровских радиусов a примесей.

На рис.1 приведена также зависимость вклада прыжка носителя заряда в поляризационную проводимость $d\sigma(r/a)/d(r/a)$ от r/a , рассчитанная для 8-миллиметрового МКВ электрического поля при случайном распределении примесей [7]. Видно, что основной вклад в прыжковую МКВ проводимость также дают пары примесей, локализованные в области $r/a = (2 - 5)$. Если концентрация таких пар $N_2 \ll N$, то

$$N_2 = v_0 N^2 \quad (1)$$

где $v_0 = (4/3)\pi \cdot r_0^3$ [13]. Квадратичные зависимости, характерные для концентрации пар с пониженной энергией ионизации были обнаружены в кремнии с примесью In [18] по температурной зависимости постоянной Холла и с примесью P [19] по поглощению в полосах, смещенных в области меньших энергий от

носителем пиков фотовозбуждения изолированных примесей. Аналогичные зависимости коэффициента поглощения k от N были установлены для ряда других примесей III и V групп [20]. Широкие спектры поглощения этих полос (рис.2) являются суперпозицией вклада пар при различных расстояниях между

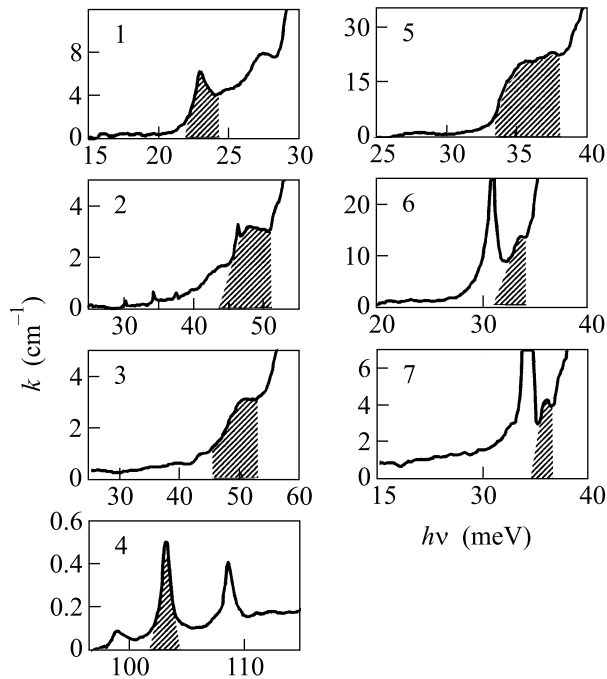


Рис.2. Спектральные зависимости коэффициентов поглощения k при 4.2 К для Si, с концентрацией примесей N (10^{16} см^{-3}): 1 – В (7.6); 2 – Al (15); 3 – Ga (16); 4 – In (40) [21]; 5 – As (18); 6 – Sb (2.6); 7 – P (1.5)

примесями. Структура полос различна как для разных примесей, так и для переходов в различные возбужденные состояния, но не зависит от концентрации примесей N .

Для сопоставления результатов [20] с (1) в спектрах на рис.2 штриховкой выделены зоны, интегральное поглощение в которых соответствует концентрациям N_2 примесей, локализованных на расстояниях не более $r_0 = 5a$. При этом боровские радиусы примесей a приняты равными $e^2/2\epsilon E_i$, (здесь e – заряд электрона, $\epsilon = 12$ – диэлектрическая проницаемость, E_i – энергия ионизации). Ширина зон определена из отношения их площадей к площадям узких пиков поглощения при переходах в соответствующие возбужденные состояния примесей с известными небольшими ($N < 10^{15} \text{ см}^{-3}$) концентрациями. Зависимости концентраций примесей в парах N_2 от концентраций N легирующих примесей, полученные на основании (1), [20] и рис.2, приведены на рис.3 [13–15]. Там же для примеси In приведена зависимость N_2 от N

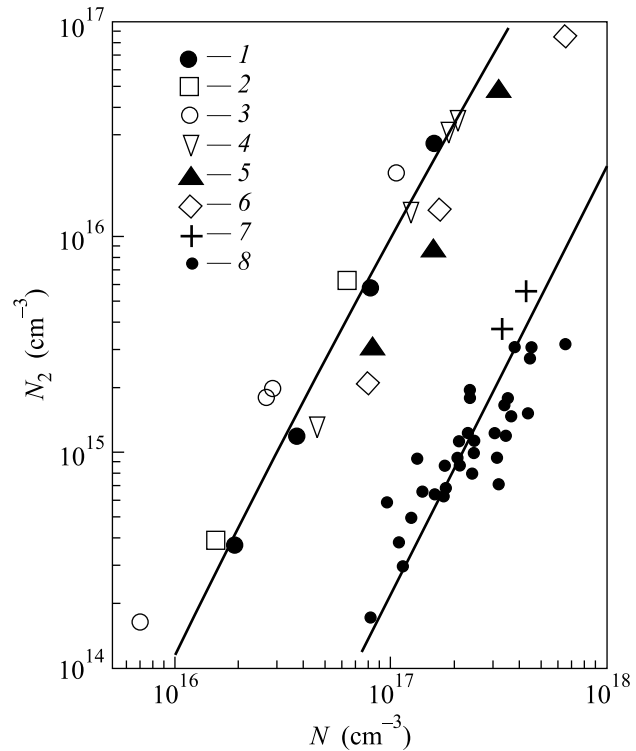


Рис.3. Зависимость концентраций примесей в парах N_2 от концентраций основных примесей N в Si, легированном: 1 – В; 2 – P; 3 – Sb; 4 – As; 5 – Al; 6 – Ga; 7 – In – по поглощению [21] и фотопроводимости [18]; 8 – In – по эффекту Холла [18]

из [18] и значения N_2 , оцененные из [18] по спектру фотопроводимости и из [21] по спектру поглощения. Видно, что значения N_2 для примеси In, определенные из различных экспериментов, согласуются. Сплошные линии соответствуют (1) для примеси В ($a = 1.3 \text{ нм}$) и In ($a = 0.38 \text{ нм}$). Длинноволновое поглощение проявляется при $Nv_0 > 10^{-2}$. Таким образом, чем сильнее локализация носителей заряда в основном состоянии примесей, тем при больших концентрациях регистрируется поглощение парами. Более того, медленная релаксация U_{MCW} возникает в тех же областях концентраций различных примесей. Это является важным указанием на участие примесных пар в МКВ ФП.

3. Оптическая перезарядка примесных состояний и релаксация возбуждения. Рассмотрим ситуацию в кремнии n -типа при термодинамическом равновесии и низких температурах. Пары легирующей примеси при $N \gg N_c$ слабо ионизованы. Ионы легирующей примеси локализуются, в основном, на ближайших расстояниях от компенсирующих ионов, образуя пары другого типа – диполи в концентрации N^{+-} . Так, при $T = 5 \text{ К}$, $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

и $N_c = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ концентрация не связанных в диполи ионов N^+ не превышает $0.1N_c$ и уменьшается при возрастании N и N_c , то есть $N^{+-} \approx N_c$ [2]. При низких температурах ионы в диполях не дают вклада в МКВ проводимость, поскольку прыжки электронов с более удаленных примесей на диполи возможны лишь при поглощении энергии.

Возбуждение вызывает случайную ионизацию примеси, а захват свободных носителей – оптическую перезарядку, уменьшающую N^{+-} и увеличивающую N^+ и N_2^+ . Прыжки электронов между такими ионизованными и нейтральными примесями дают вклад в МКВ ФП. В условиях эксперимента кремний возбуждается импульсами излучения интенсивности I и длительности Δt , много большей времени жизни свободных носителей заряда τ , но много меньшей времени релаксации U_{MCW} . Тогда за время, превышающее $\tau = 1/\alpha N_c$, устанавливается концентрация свободных носителей заряда $n = ISN/\alpha N_c$, где S – сечение фотоионизации, α – коэффициент захвата, и процесс перезарядки можно описать уравнениями [14, 15]

$$\begin{aligned} dN^{+-}/dt &= ISN - \alpha n N^{+-}; \\ N^{+-} &= N_c - N^+ \ll N, \\ dN_2^+/dt &= IS(N_2 - N_2^+) - \alpha n N_2^+, \end{aligned} \quad (2)$$

откуда

$$\begin{aligned} N^+ &= N(1 + N/N_c)^{-1}[1 - \exp(-ISNt(1 + N/N_c))], \\ N_2^+ &= N(1 + N/N_c)^{-1}[1 - \exp(-ISNt(1 + N/N_c))]. \end{aligned} \quad (3)$$

При $N \gg N_c$ амплитуды U_{MCW} , обусловленные перезарядкой изолированных примесей и примесей в парах, пропорциональны N_c . Из (3) также следует, что если за время t в единице объема произошло более N_c ионизаций ($ISNt > N_c$), то достигается предельная оптическая перезарядка примесей. Тогда в кристалле установится стационарное неравновесное состояние

$$\begin{aligned} N^+ &\approx N_c; \quad N^{+-} \approx N_c^2/N \ll N_c; \\ N_2^+ &\approx N_2 N_c/N = v_0 N N_c \ll N_2, \quad N^+. \end{aligned} \quad (4)$$

Дальнейшее возрастание интенсивности должно приводить только к увеличению концентрации свободных носителей, но не к заметному изменению концентраций ионов. Из (4) видно, что лишь малая доля примесей в парах ионизируется при перезарядке, а $N_2^+ \ll N^+$. Поэтому вклад в U_{MCW} прыжков с участием изолированных ионов примеси также следует учесть, несмотря на то, что вероятность прыжка в этом случае существенно меньше, чем в парах.

Релаксация возбуждения происходит в результате электронных переходов между нейтральными и ионизованными примесями. Нейтрализация ионизованной примеси в паре возможна в результате единственного прыжка с выделением энергии при любых $r/a > 1$, и ее скорость не должна существенно зависеть от температуры. Однако вероятность присутствия третьей примеси на малом или даже среднем расстоянии от пары должна уменьшаться при уменьшении r/a . Поэтому темп релаксации заряда у “ближних” пар должен быть более медленным, чем у “дальних”, а релаксация U_{MCW} – неэкспоненциальной. Грубая оценка показывает [15], что скорость релаксации может изменяться в пределах 10^7 – 10^1 с^{-1} , при $N \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Но скорость релаксации должна возрастать пропорционально $N\alpha^3$ и слабо зависеть от N_c , поскольку примеси в окружении пар, в основном, нейтральны.

Изолированные ионы примесей могут давать вклад в МКВ ФП (рис.1) до тех пор, пока они не свяжутся в диполи. Локализация происходит в результате прыжкового дрейфа заряда ионов в постоянном электрическом поле ионов компенсирующей примеси. Среднее время дрейфа есть максвелловское время релаксации пространственного заряда [11, 14, 15]

$$\tau_m = \varepsilon/4\pi\mu e N^+, \quad (5)$$

определяемое локальной проводимостью среды $\sigma = e\mu N^+$. При предельной оптической перезарядке ($N^+ \approx N_c$) временную зависимость концентрации N^+ можно описать выражением

$$N^+ = N_c \exp(-t/\tau_m). \quad (6)$$

При этом само τ_m зависит от концентрации изолированных ионов N^+ . Для сравнения с экспериментом (6) удобно записать в виде

$$-(\varepsilon/4\pi e\mu N_c)(N_c/N^+) \ln(N^+/N_c) = t. \quad (7)$$

Характерным проявлением этой компоненты U_{MCW} должно быть возрастание темпа релаксации как при увеличении N_c , так и при увеличении N и T благодаря возрастанию прыжковой подвижности μ . Следует ожидать, что прыжки с участием ионов N^+ будут проявляться при относительно высоких концентрациях N . При меньших же концентрациях, когда время релаксации заряда больше периода импульсного возбуждения, установится квазистационарная концентрация N^+ , и эта компонента U_{MCW} не будет регистрироваться. Таким образом влияние концентраций примесей и температуры на релаксацию МКВ

ФП с участием пар и изолированных примесей должно быть существенно различным. Это позволяет выяснить условия, при которых каждый из процессов преобладает.

4. Релаксация поляризационной фотопроводимости. Для исследования кинетики примесного фотоответа [13–15] образцы легированного кремния возбуждались импульсами излучения CO_2 -лазера (10.6 мкм) с частотой ≈ 200 Гц. Временные зависимости фотоответов в постоянном и микроволновом электрических полях анализировались стробинтегратором с апертурами 0.5 или 5 мкс. Длительность импульса $\Delta t \sim 0.5$ мкс была много больше времени жизни свободных носителей заряда τ , но много меньше времени релаксации U_{MCW} . Энергия импульсов при $N_c \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ обычно не превышала 10^{-6} Дж и была достаточной для насыщения медленной компоненты МКВ сигнала. Дальнейшее увеличение интенсивности вызывало возрастание лишь быстрой компоненты U_{MCW} , повторявшей ответ при постоянном смещении. Быстрая и медленная компоненты U_{MCW} были в одинаковой полярности, соответствовавшей увеличению поглощения МКВ излучения из-за возрастания проводимости образцов при возбуждении.

На рис.4 приведены зависимости фотоответа U_{MCW} от времени t для кремния, легированного рядом примесей III и V групп. Из рисунка видно, что для всех примесей релаксация ответа неэкспоненциальна. Начало релаксации соответствует временам 10–50 мкс, которые возрастают до 0.5–2.5 мс при увеличении задержки регистрации. Из рисунка видно также, что темп релаксации зависит от природы примесей. Так, при $N = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ скорость релаксации в кремнии с P, Al и Ga уменьшается по мере уменьшения боровских радиусов a этих примесей.

Время релаксации U_{MCW} зависит и от концентрации основной примеси N . На рис.5 и 6 приведены временные зависимости U_{MCW} для кремния, легированного бором в относительно небольших концентрациях. Видно, что время релаксации вначале изменяется от 25 мкс ($N = 1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) до 10 мкс ($N = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), а при задержке регистрации 1 мс – от 1.2 мс до 0.5 мс, то есть уменьшается приблизительно как $1/N$. Однако из рис.5 видно, что при равных концентрациях N временные зависимости U_{MCW} отличаются незначительно, даже если концентрации N_c в образцах отличаются в несколько раз. Амплитуда же ответа возрастает при увеличении N_c . Это согласуется с [4], где для серии образцов, легированных В ($N = 3.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и компенсирован-

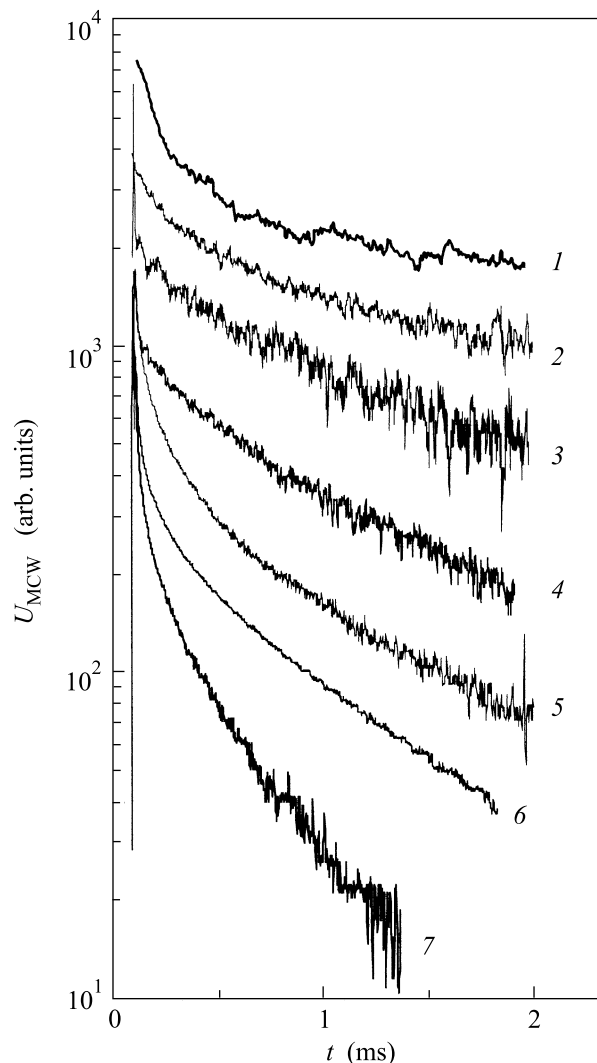


Рис.4. Временные зависимости фотоответа в микроволновом электрическом поле U_{MCW} Si, легированного примесями в концентрациях (10^{16} см^{-3}): 1 – In (10); 2 – Sb (2.6); 3 – Ga (6); 4 – В (2.4); 5 – Al (6); 6 – P (6); 7 – As (18)

ных P, было установлено, что при частоте модуляции $f = 1$ кГц интенсивного (20–50 мВт) возбуждения $U_{\text{MCW}} \sim N_c$.

Такие простые зависимости наблюдались до концентраций бора $N < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а далее вновь проявлялась более медленная компонента релаксации U_{MCW} (рис.7). Из рисунка видно, что при 4.2 К временные зависимости U_{MCW} при $t > 0.5$ мс сходны, хотя концентрации N и N_c в образцах сильно различаются. Однако при повышении температуры до 10.5 К темп релаксации при $N = 2.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ не изменялся, в то время как при $N = 5.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ он возрастал приблизительно на порядок. Отсюда следует, что при относительно небольших концентраци-

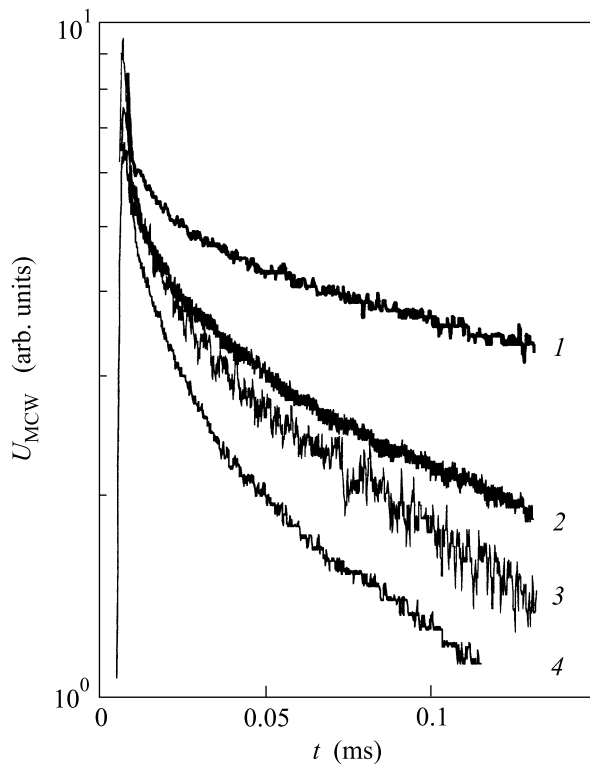


Рис.5. Временные зависимости U_{MCW} Si, легированного В и Р в концентрациях N , N_c (10^{16} см^{-3}): 1 – $(1.8, 10^{-2})$; 2 – $(3.3, 10^{-2})$; 3 – $(3.3, 2 \cdot 10^{-3})$; 4 – $(3.95, 10^{-2})$. Апертура 0.5 мкс

ях бора основной вклад в поляризационную ФП дают прыжковые переходы между парами основной примеси (рис.5,6), в то время как при возрастании N проявляется медленная релаксация U_{MCW} , связанная с вкладом в ФП изолированных ионов. В последнем случае временная зависимость $U_{MCW} \sim N^+$ должна описываться логарифмическим законом (7).

На рис.8 приведены временные зависимости U_{MCW} для двух образцов, преобразованные, согласно (7), к виду

$$[U(0)/U(t)] \ln[U(t)/U(0)] = t. \quad (8)$$

Видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на прямые линии. Наклон этих линий соответствует $-\varepsilon/4\pi e\mu N_c$. Отсюда следует, что подвижность μ не зависит от времени и имеет обычный физический смысл. Из рис.8 следует, что в образце 1 ($N = 5.5 \cdot 10^{16}$, $N_c = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) при 4.2 К $\sigma(0) = 2.4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, при 10.5 К $\sigma(0) = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а прыжковые подвижности μ равны, соответственно, $3 \cdot 10^{-5}$ и $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В образце 2 ($N = 1.15 \cdot 10^{17}$, $N_c = 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при 4.2 К $\sigma(0) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\mu = 1.25 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Эти результаты подтверждают

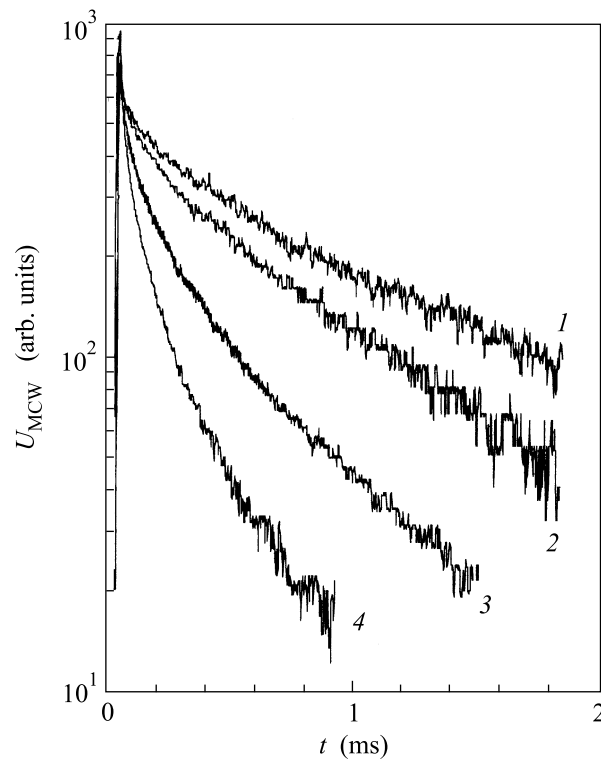


Рис.6. Временные зависимости U_{MCW} Si, легированного В и Р в концентрациях N (10^{16} см^{-3}) и $N_c = 10^{14} \text{ см}^{-3}$: 1 – (1.8); 2 – (2.4); 3 – (3.3); 4 – (3.95). Апертура 5 мкс

вклад прыжковых переходов изолированных ионов N^+ в поляризационную ФП. Однако абсолютные значения прыжковой проводимости в постоянном поле ионов компенсирующей примеси на несколько порядков выше величин, типичных для легированного кремния при термодинамическом равновесии. Более того, проводимость образца 1 возрастает при повышении температуры от 4.2 до 10.5 К всего на один порядок, в то время как при энергии активации $E_3 = 4.3 \text{ мэВ}$, соответствующей концентрации $5.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, следовало бы ожидать возрастания σ приблизительно в 250 раз (см. [22, 23] и ссылки там же). Такое расхождение естественно по двум причинам. Во-первых, при низких температурах в отсутствие возбуждения большинство ионов основной примеси связано в диполи [3], которые не дают вклада в прыжковую проводимость. Во-вторых, дрейф заряда ионов основной примеси происходит в результате нескольких прыжков в потенциальной яме по состояниям примесей с энергиями, убывающими при приближении к ионам компенсирующей примеси. Такой перенос заряда не является активационным и его скорость может вообще не зависеть от температуры. Возможно, что наблюдаемая температурная зависимость связана с термической ионизацией ди-

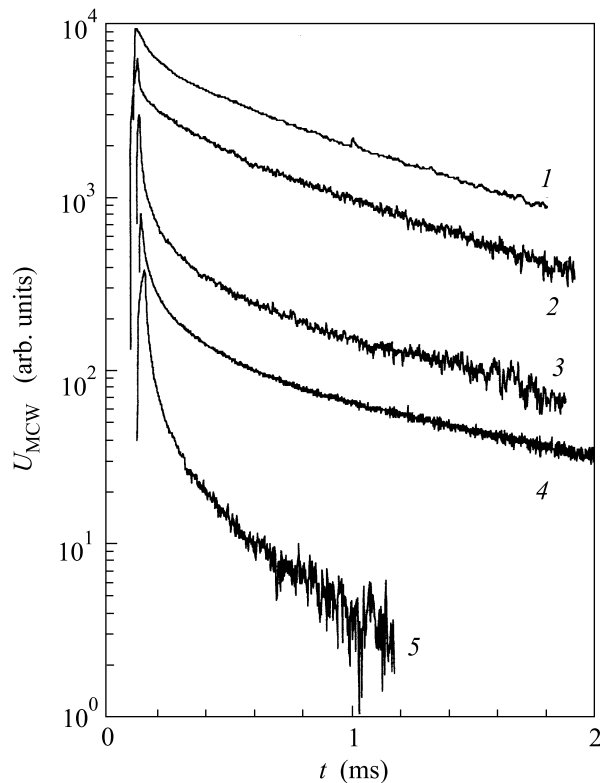


Рис. 7. Временные зависимости U_{MCW} Si, легированного В и Р в концентрациях N, N_c (10^{16} см^{-3}): 1 – $(2.4, 10^{-2})$, 4.2 К; 2 – $(2.4, 10^{-2})$, 10.5 К; 3 – $(11.5, 10^{-2})$, 4.2 К; 4 – $(5.5, 0.5)$, 4.2 К; 5 – $(5.5, 0.5)$, 10.5 К

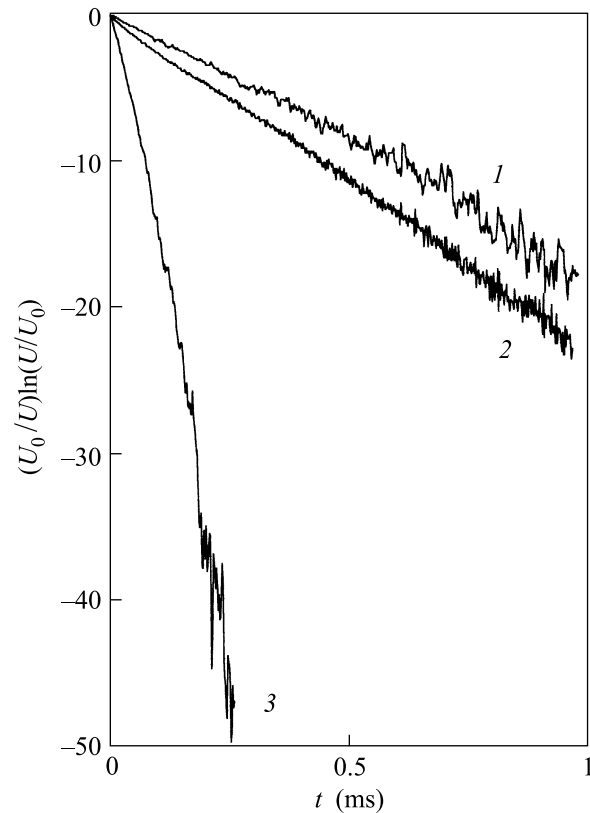


Рис. 8. Временные зависимости фотоответа $[U(0)/U(t)] \cdot \ln(U(t)/U(0))$ Si, легированного В и Р в концентрациях N, N_c (10^{16} см^{-3}): 1 – $(11.5, 10^{-2})$, 4.2 К; 2 – $(5.5, 0.5)$, 4.2 К; 3 – $(5.5, 0.5)$, 10.5 К

полей при 10.5 К [2], приводящей к увеличению равновесной концентрации N^+ и возрастанию темпа релаксации. Таким образом, прыжковая проводимость в постоянном электрическом поле точечных зарядов, определяющая скорость релаксации МКВ ФП, принципиально отличается от перколяционной проводимости во внешнем поле. При величинах проводимости, определенных из рис. 8, медленную компоненту ее релаксации в постоянном поле было бы легко обнаружить уже при 4.2 К. Однако даже при повышенных температурах и достаточно чувствительном методе регистрации эту компоненту выделить не удалось.

Заключение. На основании проведенных экспериментов дано простое объяснение физической природы прыжковой фотопроводимости легированного кремния в микроволновом электрическом поле. Оно основано на учете взаимодействий, в результате которых примеси могут находиться в состояниях изолированных атомов и ионов, пар основной примеси и диполей (пар ионов основной и компенсирующей примесей). По спектрам полос поглощения оценены концентрации пар примесей N_2 в кремнии, легированном В, Al, Ga, In, Р, As, Sb в концентрациях N

($10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Установлено, что эти полосы проявляются, если $N_2 > 10^{-2} N$. При этом чем сильнее локализация носителя заряда в основном состоянии примесей, тем при больших концентрациях проявляется длинноволновое поглощение. Показано, что поглощение парами примесей и медленная релаксация МКВ ФП возникают при близких концентрациях N . Релаксация МКВ ФП при примесном импульсном фотовозбуждении неэкспоненциальна, а ее темп возрастает при увеличении N , но слабо зависит от температуры и компенсации. На примере примеси В показано, что эти закономерности выполняются при $N < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При увеличении концентрации вновь проявляется более медленная релаксация МКВ ФП, темп которой возрастает при возрастании температуры и компенсации. Установленные закономерности объяснены оптической перезарядкой примесей в различных состояниях при их фотоионизации. В результате концентрация диполей N^{+-} , в которые до возбуждения были связаны ионы основной и компенсирующей примесей, уменьшается, а концентрации ионизованных примесей в парах N_2^+ и изо-

лированных ионов N^+ возрастает. Эти ионы могут участвовать в прыжковых переходах и дают вклад в МКВ ФП. При увеличении интенсивности возбуждения достигается предельная оптическая перезарядка, при которой медленная компонента МКВ ФП насыщается. Релаксация перезарядки происходит в результате прыжкового переноса зарядов ионов. Для нейтрализации пары достаточно одного прыжка, и этот быстрый процесс релаксации преобладает при небольших концентрациях N . Изолированные ионы дают вклад в ФП до тех пор, пока за время прыжкового дрейфа заряда в электрическом поле ионов компенсирующей примеси они опять не свяжутся в диполи. Скорость процесса в этом случае определяется временем релаксации пространственного заряда, то есть проводимостью среды, зависящей как от концентраций основной и компенсирующей примесей, так и от температуры. Таким образом МКВ ФП с участием изолированных ионов проявляется при больших концентрациях и значительной компенсации. Дрейф происходит в потенциальных ямах ионов компенсирующей примеси и не связан с перколяцией. Локальная проводимость, определяющая время дрейфа, на несколько порядков превышает перколяционную проводимость кремния с близким примесным составом.

Исследования в 1987–2001 гг. были проведены совместно с О. И. Смирновой. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты # 93-02-2070, # 96-02-16243, # 99-02-16078 и # 02-02-16272).

1. И. В. Алтухов, Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова и др., ФТП **24**, 1134 (1990).
2. В. Н. Абакумов, В. И. Перель, И. Н. Ясневич, *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках*, С-Петербург, Издательство "Петербургский ин-т физики им. К.И.Константинова РАН", 1997.
3. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Письма в ЖЭТФ **51**, 377 (1990).

4. Ya. E. Pokrovskii and O. I. Smirnova, *Mat. Science Forum*, Ed. G. Davis, Trans. Tech. Publ., Zurich, v. 65-67, 1990, p. 271.
5. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Н. А. Хвальковский, Письма в ЖЭТФ **61**, 602 (1995).
6. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Н. А. Хвальковский, ЖЭТФ **114**, 2204 (1998).
7. M. Pollak and T. M. Geballe, *Phys. Rev.* **122**, 1724 (1961).
8. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Н. А. Хвальковский, ЖЭТФ **117**, 457 (2000).
9. A. K. Ramdas and S. Rodrigues, *Rep. Progr. Phys.* **44**, 1278 (1981).
10. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, ЖЭТФ **102**, 660 (1992).
11. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, ЖЭТФ **103**, 1411 (1993).
12. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Н. А. Хвальковский, Письма в ЖЭТФ **66**, 224 (1997).
13. Ya. E. Pokrovskii and N. A. Khvalkovskii, *Phys. Stat. Sol.(c)* **0**, 707 (2003).
14. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, ФТП **37**, 1305 (2003).
15. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, РЭ **48**, 1120 (2003).
16. *Таблицы физических величин*, п/ред. К. И. Кикоина, М.: Атомгиз, 1976.
17. Sh. M. Kogan and A. F. Polupanov, *Proc. 3 Int. Conf. on Shallow Impurities in Semicond.*, Linchoping, Sweden, 10–12 aug. 1988, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **95**, 1989, p.527.
18. F. Baron, M. Young, O. J. Neeland, and O. Marsh, *Appl. Phys. Lett.* **30**, 694 (1977).
19. G. Thomas, M. Capizzi, F. De Rosa F. et al., *Phys. Rev.* **B23**, 5472 (1984).
20. Я. Е. Покровский, О. И. Смирнова, Н. А. Хвальковский, ЖЭТФ **122**, 97 (2002).
21. W. Scott, *Appl. Phys. Lett.* **32**, 540 (1978).
22. Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос, *Электронные свойства легированных полупроводников*, М.: Наука, 1979.
23. R. K. Ray and H. Y. Fan, *Phys. Rev.* **121**, 768 (1961).