

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В КРЕМНИИ, СОДЕРЖАЩЕМ ЦЕНТРЫ ПРИЛИПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

В.А. Миляев, В.А. Никитин, А.В. Ширков

Из температурных зависимостей релаксации СВЧ фотопроводимости в кремнии КДБ-10, содержащем кислородные преципитаты, выращенные в процессе формирования внутреннего геттера, бесконтактным неразрушающим способом определены глубина залегания уровня прилипания в запрещенной зоне ($E_c - 0,022$ эВ) и сечение захвата электрона ($2,75 \cdot 10^{-21}$ см²).

Релаксация фотопроводимости нередко сопровождается процессами прилипания неравновесных носителей, когда из двух носителей, генерированных световым квантом, один захватывается на некоторое время уровнем прилипания (УП), а другой диффундирует в кристалле без рекомбинации /1/. Это приводит к появлению на релаксационной кривой характерной медленно спадающей (для кремния — миллисекунды) части, исчезающей при введении помимо основного импульсного возбуждения постоянной подсветки. Как уже сообщалось, для кремния КДБ-10, содержащего кислородные преципитаты, выращенные в процессе формирования внутреннего геттера, концентрация центров прилипания коррелирует с плотностью дефектов, связанных с преципитатами, выявляемых селективным травлением скола пластины, и с данными секционной рентгеновской топографии /2/. Представляло интерес оценить глубину залегания УП в запрещенной зоне и сечение захвата электрона.

Методика бесконтактного неразрушающего исследования процессов прилипания и рекомбинации неравновесных носителей в кремнии методом СВЧ описана в работах /2, 3/. Добавлением к методике явилась система охлаждения исследуемого образца до азотной температуры, состоящая из пенопластового стакана с оптическими окнами, помещенного в открытый резонатор, медь-константановой термопары и теплоизолированной трубки для подачи под давлением паров азота. Для измерений был выбран образец № 7, исследованный в работе /2/, с наилучшим по серии качеством внутреннего геттера. Типичная запись сигнала фотопроводимости приведена на рис. 1.

Из температурной зависимости времени нахождения электрона на уровне прилипания (τ_2 в работе /3/) можно найти глубину залегания уровня в запрещенной зоне и сечение захвата электрона, используя формулу

$$1/\tau_2 = \sigma V_T 2(2\pi m_e kT/h^2)^{3/2} \exp(-E_m/kT),$$

где V_T — тепловая скорость электрона, σ и E_m — сечение захвата и глубина уровня прилипания от зоны проводимости. Для кремния учет соответствующих коэффициентов приводит к выражению

$$1/\tau_2 T^2 = C \exp(-E_m/kT),$$

где $C = 3,94 \cdot 10^{20}$ (τ_2 — в секундах, T — в Кельвинах, σ — в см², E_m — в эВ).

Следует подчеркнуть, что представленная релаксационная кривая не является экспонентой, так как существенен процесс перезахвата высвободившихся с уровней прилипания носителей. Поэтому аппроксимация части кривой экспонентой дает возможность найти только верхний предел для τ_2 . Однако при изменении температуры изменяется существенным образом только τ_2 , поэтому в первом приближении экспериментальную кривую можно считать суммой нескольких экспонент, одна из которых зависит от температуры. В самом деле, начиная с $t=135$ мкс и до конца записи (рис. 1) кривая описывается в пределах точности

измерений экспонентой с характерным временем $\tau = 410$ мкс. На рис. 2 представлена так называемая линия Аррениуса — зависимость $\ln(\tau T^2)$ от $1/T$, наклон которой дает положение уровня $E_c = 0,022$ эВ (точность 3%); соответствующий нижний предел для сечения захвата $2,75 \cdot 10^{-21}$ см².

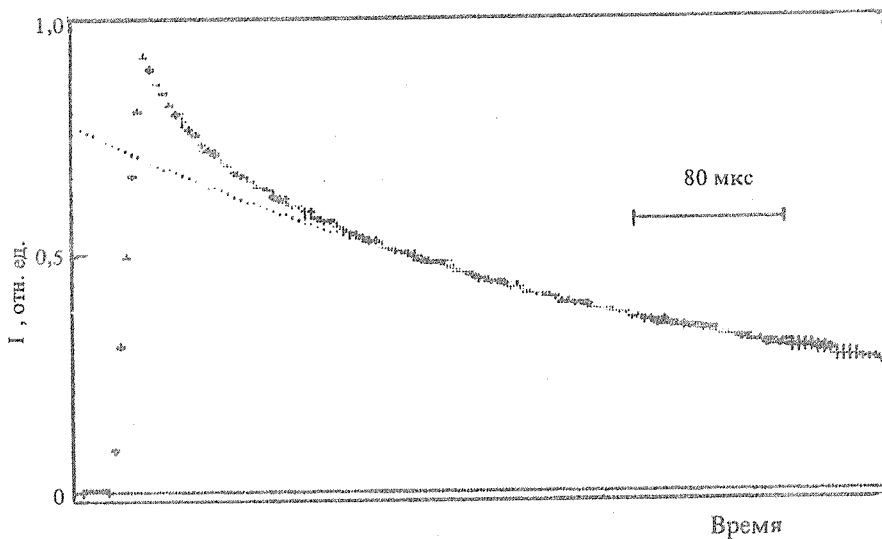


Рис. 1. Запись сигнала импульсного возбуждения (длительность 19 мкс) и спада фотопроводимости I при $T = 206$ К. Часть сигнала аппроксимирована экспонентой с характерным временем 410 ± 5 мкс.

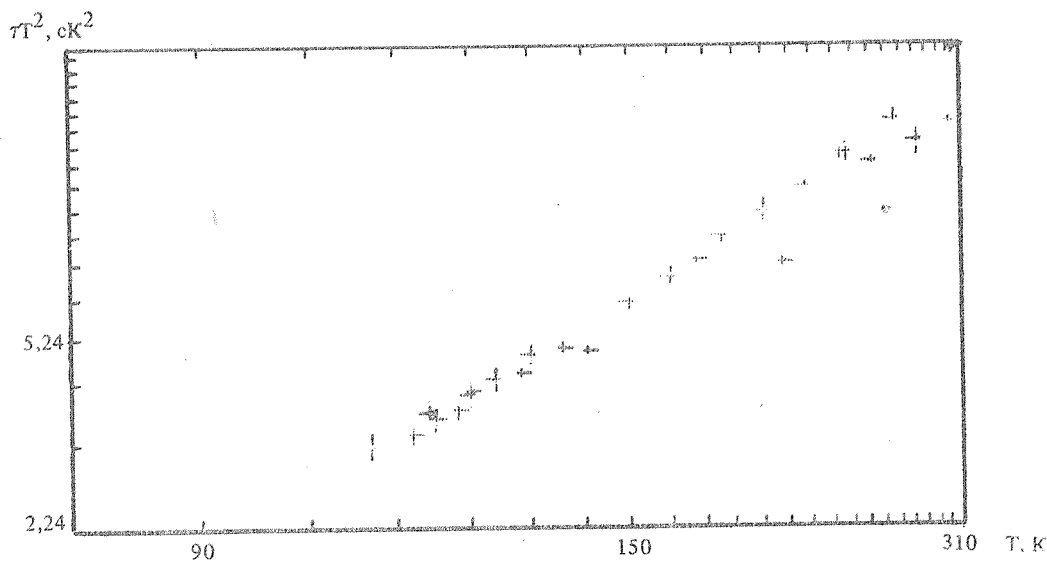


Рис. 2. Линия Аррениуса — зависимость $\ln(\tau T^2)$ от $1/T$ для значений τ , полученных аппроксимацией экспонентой кривых спада фотопроводимости.

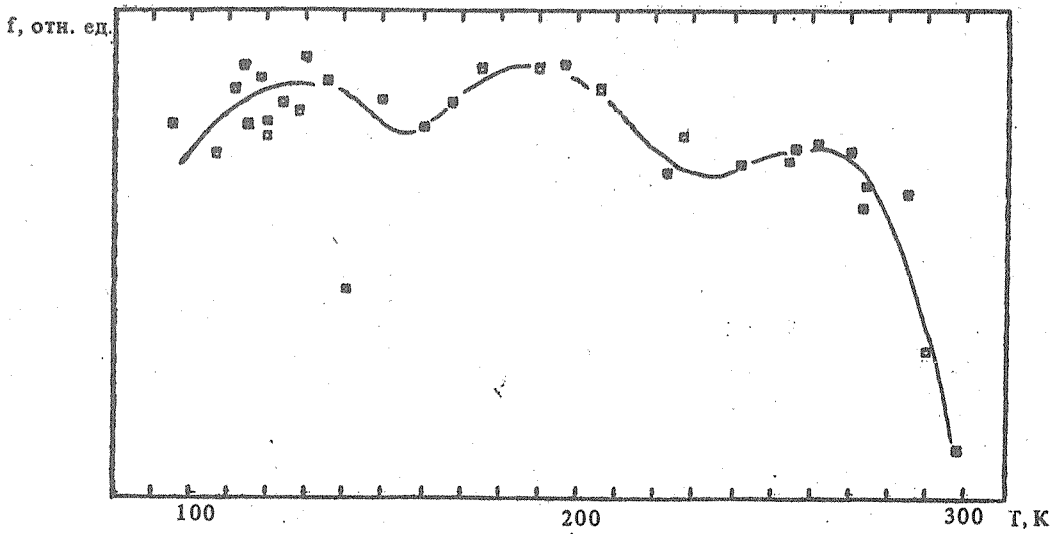


Рис. 3. Пример экспериментальной зависимости $f(T)$ для значений $t_1 = 276$ мкс и $t_2 = 414$ мкс (соответствующее $\tau = 333$ мкс). За начало отсчета для t_1 и t_2 принято окончание импульса возбуждения.

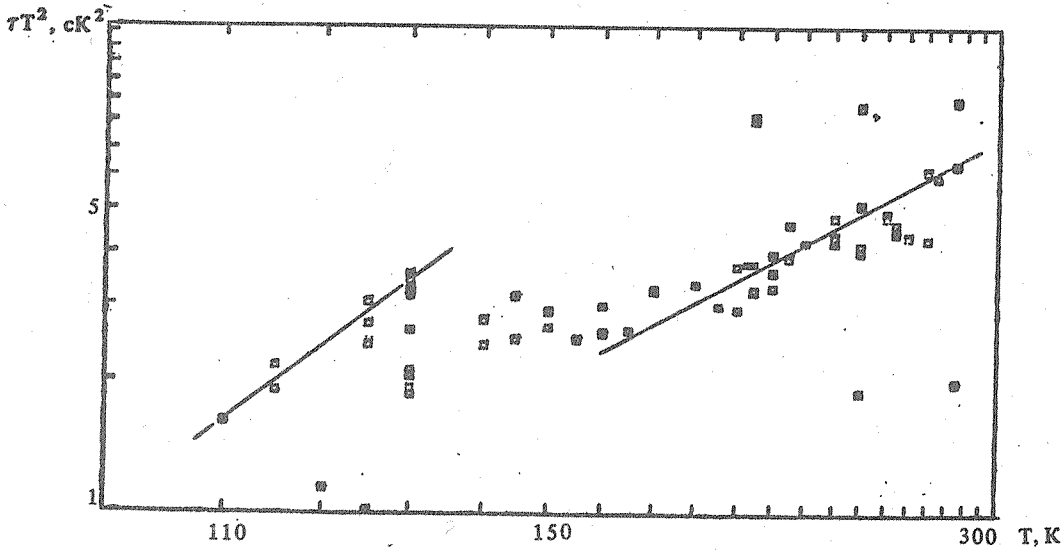


Рис. 4. Линия Аррениуса для значений τ , полученных обработкой экспериментальных кривых двухсторонним методом.

Серия экспериментальных кривых обрабатывалась также двухсторонним методом, традиционным для методики релаксационной спектроскопии глубоких уровней /4/. Суть его заключается в том, что функция $f(\tau) = \exp(-t_1/\tau) - \exp(-t_2/\tau)$, где $t_1 < t_2$, имеет максимум, определяемый условием $(t_1 - t_2)/\tau = \ln(t_1/t_2)$. Обработывая таким образом серию экспериментальных кривых для разных температур, можно для каждой выбранной пары t_1 и t_2 найти точку зависимости $\tau(T)$. Если экспериментальная кривая является суммой экспонент, из которых показатель только одной зависит от температуры, или даже более сложной функцией, содержащей искомый экспоненциальный член, это никак не скажется на положении

максимума на кривой $i(\tau(T))$. При наличии в запрещенной зоне нескольких уровней на зависимости $f(T)$ будет несколько максимумов (рис. 3).

На рис. 4 представлена линия Аррениуса, построенная по данным двухстробового метода. Можно выделить два прямолинейных участка, один в диапазоне температур 170–300 К, соответствующий уровню $E_c - 0,028$ эВ (точность 8%), $\sigma = 1,75 \cdot 10^{-21}$ см², второй — в диапазоне 110–130 К, соответствующий уровню $E_c - 0,047$ эВ (точность 12%), $\sigma = 3,80 \cdot 10^{-20}$ см². Отметим, что один из полученных уровней практически совпадает с уровнем, найденным с помощью обработки экспериментальных кривых первым способом.

Таким образом, можно утверждать, что прилипание неравновесных электронов в кремнии р-типа, подвергнутом операции внутреннего геттерирования, обусловлено наличием уровней, глубина залегания которых в запрещенной зоне сравнима с kT ($T = 300$ К), с сечением захвата порядка 10^{-21} см².

ЛИТЕРАТУРА

1. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963, с. 496.
2. Гулидов Д. Н. и др. МЭ, 17, № 1, 19 (1988).
3. Житов В. А. и др. ФТП, 20, в. 1, 182 (1986).
4. Balland J. C. et al. J. Phys. D: Appl. Phys., 19, 71 (1986).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 23 мая 1988 г