

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Т.М.Лифшиц, Н.Н.Лихтман, В.И.Сидоров

В работах [1–4] сообщалось о явлении фототермической ионизации примесей, обнаруженном и исследованном в германии, легированном примесями III или V групп. Напомним, что сущность этого явления состоит в оптическом возбуждении примесного центра с последующим поглощением одного или нескольких фононов. В результате такого процесса носитель заряда переходит в одну из свободных зон кристалла, где может участвовать в процессах переноса заряда. Таким образом, фототермическая ионизация примесей приводит к возникновению фотопроводимости, спектральное распределение которой при определенных условиях представляет собой систему линий, расположенных в области энергий фотонов, меньших энергии ионизации примеси. Число этих линий и их расположение на шкале длин волн отражает энергетический спектр состояний, создаваемых примесью данного сорта в кристалле.

В настоящей заметке мы хотим указать на одну особенность фотопроводимости, связанной с фототермической ионизацией примесей, которая позволяет использовать ее для обнаружения в полупроводниках весьма малых количеств примесей и устанавливать их химическую природу.

Известно, что энергетический спектр примесного центра в кристалле может быть определен из измерений спектров оптического поглощения соответствующих материалов. Однако, величина примесного оптического поглощения линейно связана с концентрацией примесей и уменьшается с уменьшением последней. Поэтому такие измерения можно проводить в материалах с не слишком малой концентрацией примесей. Например, в германии с примесями III, V групп примесное поглощение мало уже при концентрации $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и его измерение составляет трудную задачу, а при концентрации $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ измерение примесного поглощения практически невозможно.

В противоположность этому, фотоответ примесной фотопроводимости (напряжение сигнала, отнесенное к мощности падающего излучения), пропорциональный относительно изменению концентрации носителей заряда при облучении $\Delta n_{\text{фот}}/n_{\text{темн}}$ не зависит от концентрации примесей и степени их компенсации (см. [5]). Фотопроводимость же, обусловленная фототермической ионизацией, при уменьшении концентрации примесей даже заметно возрастает, линии в ее спектре, характеризующие химическую природу примесей, становятся более узкими и высота их увеличивается. Здесь сказывается уменьшение воздействия на примесный центр полей хаотически расположенных соседних примесных атомов. Если в образцах с относительно высокой концентрацией примесей ($10^{13} + 10^{14} \text{ см}^{-3}$) линии в спектре фотопроводимости возникают только при температуре образцов, на несколько градусов превышающей температуру у жидкого гелия, то в образцах, где концентрация примесей очень мала ($10^{11} + 10^{12} \text{ см}^{-3}$), эти линии четко вид-

ны уже при температуре $4,2^{\circ}\text{K}$, а при повышении температуры до 10°K их высота становится больше, чем величина сигнала в максимуме обычной примесной фотопроводимости.

В спектре оптического поглощения с уменьшением концентрации примесей также должно происходить сужение и возрастание линий относительно максимума поглощения, соответствующего оптической ионизации примесей. Однако этот эффект мало существенен на фоне уменьшения поглощения с концентрацией поглощающих центров.

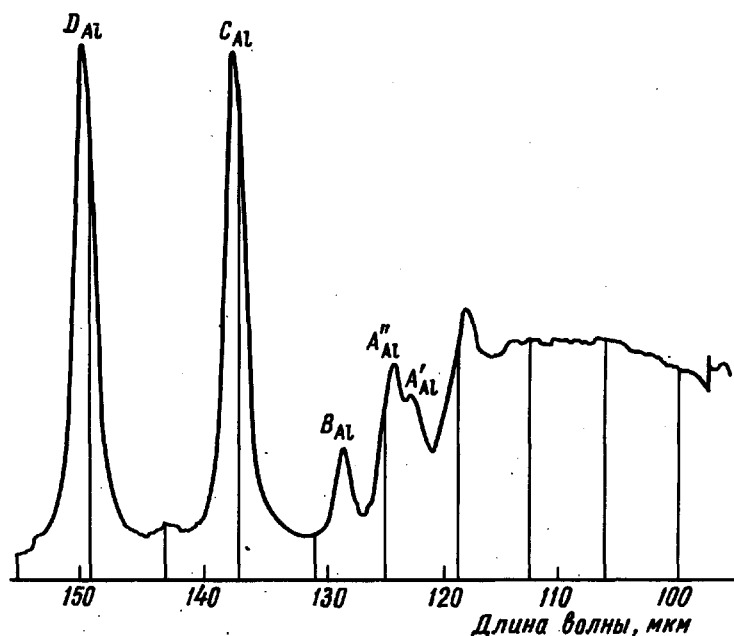


Рис.1. Длинноволновый участок спектра фотопроводимости чистого германия с разностной концентрацией примесей $\text{Na} - \text{Ng} - 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T = 8^{\circ}\text{K}$

На рис.1 и 2 приведены записи спектров фотопроводимости двух образцов германия из числа наиболее чистых, которыми мы располагаем*. Оба образца p -типа. Концентрация нескомпенсированных акцепторов, определенная из измерений коэффициента Холла при температуре жидкого азота, составляла в первом образце $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а во втором $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Участки кривых в области длин волн $\lambda < 120 \text{ мк}$ соответствуют обычной примесной фотопроводимости. Фотоответ при облучении образца излучением малой мощности от монохроматора (10^{-7} Вт) составляет $0,1 - 1 \text{ мВ}$ — величину, без труда измеримую с помощью, например, простого усилителя напряжения звуковой частоты. Каждый из приведенных спектров был получен за время измерения около 10 мин при постоянной времени измерительного устройства 2 сек .

Спектры примесного оптического поглощения в настоящее время хорошо известны для всех примесей III и V групп в германии [6,7]. До-

статочного наложения этих спектров на кривые рис.1 и 2, чтобы сразу определить, что в первом образце содержится только один мелкий акцептор – алюминий, а во втором два – бор и алюминий.

Поскольку суммарная концентрация нескомпенсированных акцепторов, как уже говорилось, известна, можно определить концентрации

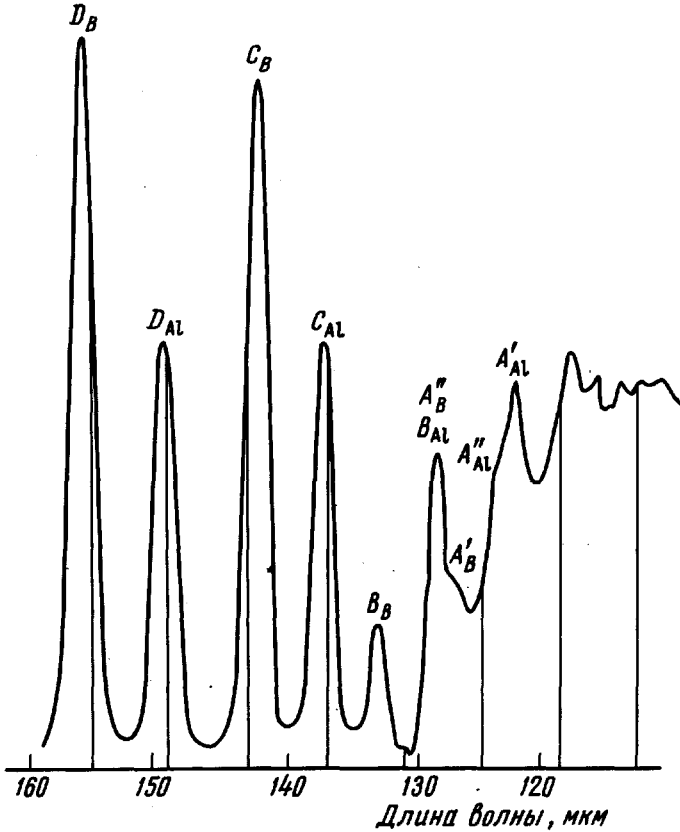


Рис.2. Длинноволновый участок спектра фотопроводимости чистого германия с разностной концентрацией примесей $\text{Na} - \text{Ng} - 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; $T = 10^\circ\text{K}$

каждой из примесей отдельно. Таким образом, предлагаемый метод, который мы называем методом фотоэлектрической спектроскопии примесей в полупроводниках, уже по полученным данным превосходит по чувствительности другие известные методы, по крайней мере, для примесей III и V групп в германии. В то же время вид спектров рис.1 и 2 позволяет рассчитывать на возможность с помощью этого метода определять присутствие и устанавливать химическую природу примесей III, V групп в германии и в тех случаях, когда их концентрация будет значительно меньше, чем 10^{11} см^{-3} . Не исключена также возмож-

ность распространения описанного метода на другие полупроводники и другие примеси, а также, при использовании известного явления оптической перезарядки примесей [8], определения полной концентрации доноров и акцепторов, содержащихся в материале.

Институт
радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
5 ноября 1967 г.

Литература

- [1] Т.М.Лифшиц, Ф.Я.Надь. ДАН СССР, 162, 801, 1965.
- [2] Ш.М.Коган, Б.И.Седунов. ФТТ, 8, 2382, 1966.
- [3] В.И.Сидоров, Т.М.Лифшиц. ФТТ, 8, 2497, 1966.
- [4] Т.М.Лифшиц, Ф.Я.Надь, В.И.Сидоров. ФТТ, 8, 3208, 1966.
- [5] В.И.Сидоров, Т.М.Лифшиц. Радиотехника и электроника, 7, 2076, 1962.
- [6] R.L.Jones, P.Fisher. J.Phys. Chem. Sol., 26, 1125, 1965.
- [7] I.H.Reuszer, P.Fisher. Phys. Rev., 135, 1125, 1964.
- [8] С.М.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Физматгиз, М., 1963, стр.267

* Авторы благодарны В.П.Аверьяновой и М.И.Гинзбург за предоставление образцов чистого германия.