

- [3] Flicker H., Loferski I. I., Scott-Monck I. // Phys. Rev. 1962. V. 128. N 6. P. 2557—2563.
 [4] Oen O. S., Holmes D. K. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. N 8. P. 1289—1295.
 [5] Витовский Н. А., Мустафакулов Д., Чекарцева А. П. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 9. С. 1747—1753.
 [6] Вавилов В. С., Пацкевич В. М., Юрков Б. Я., Глазунов П. Я. // ФТТ. 1960. Т. 2. В. 7. С. 1431—1433.
 [7] Flicker H., Loferski I. I. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 8. P. 2146—2149.
 [8] Берман Л. С., Воронков В. Б., Кожух М. Л., Кушашвили К. Ш., Толстобров М. Г. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1100—1102.
 [9] Берман Л. С., Витман Р. Ф., Шуман В. Б. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 2. С. 311—315.
 [10] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
 [11] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Толстобров М. Г. // Препринт ФТИ АН СССР. Л., 1985. № 974.
 [12] Берман Л. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 5. С. 959.
 [13] Болотов В. В., Карпов А. В., Стучинский В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 49—55.
 [14] Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. М.—Л., 1950. 500 с.
 [15] Seitz F., Koehler J. // Sol. St. Phys. 1950. V. 2. P. 307—442.
 [16] Винецкий В. Л., Ентинзон И. Р., Холодарь Г. А. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 912—918.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 21.09.1988
Принято к печати 20.12.1988

ФТП, том 23, вып. 4, 1989

ДЛИННОВОЛНОВАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ КОМПЕНСИРОВАННОГО ГЕРМАНИЯ С МЕДЬЮ

Дружинин Ю. П., Чиркова Е. Г.

Обнаруженная авторами работы [1] локализация электронов в случайном потенциале заряженной примеси свидетельствует о значительных изменениях в энергетическом спектре компенсированного германия. Естественно ожидать, что исследование спектральных зависимостей фотопроводимости в области энергий ионизации мелких примесей позволит непосредственно наблюдать такие изменения.

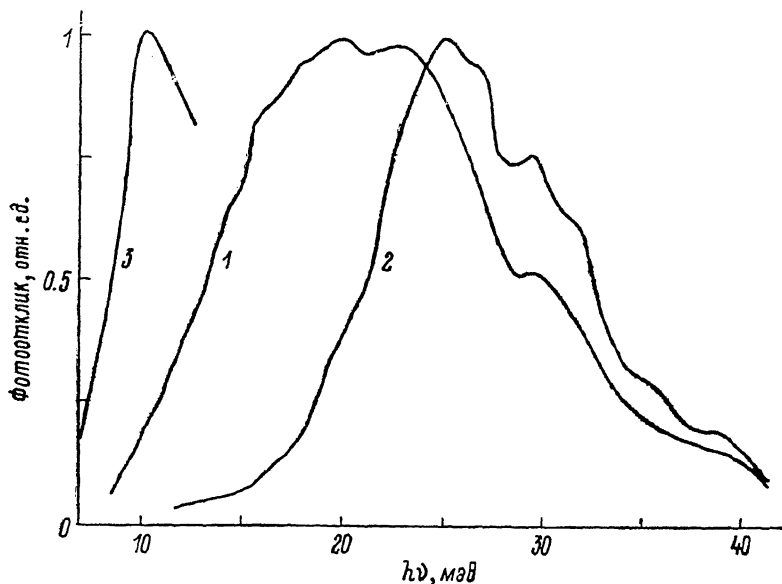
В данной работе исследовалась фотопроводимость Ge : Cu : Sb *n*-типа с $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне длин волн от 25 до 150 мкм при различных температурах. Источником ИК излучения служил длинноволновый решеточный монохроматор FIS-21. Спектральные измерения проводились с разрешением $\delta h\nu/h\nu \approx 3\%$. Фоновая подсветка создавалась освещением образца лампой накаливания через германиевый фильтр с $T=300 \text{ К}$.

На рисунке приведены спектры фотопроводимости компенсированного Ge *n*-типа, записанные при 4.2, 15.6 К и $E=100 \text{ В/см}$, а также спектр фотопроводимости некомпенсированного Ge (β) с $N_D \approx 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при 4.2 К, взятый из работы [2].

Видно, что спектры фотопроводимости образцов некомпенсированного и компенсированного материалов существенно различаются. Спектр фотопроводимости компенсированного Ge сдвинут в область больших энергий фотонов. Повышение температуры до $\approx 16 \text{ К}$ приводит к исчезновению фотоотклика при $h\nu \leq 15 \text{ мэВ}$. В работе [3] приводятся результаты исследования фотопроводимости Ge : Au : Sb с концентрацией доноров $N_D \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Согласно [3], форма спектра фотопроводимости компенсированного Ge не меняется с температурой и в общих чертах повторяет форму, наблюдаемую для образца некомпенсированного Ge : Sb.

Несовпадение наших данных о фотопроводимости компенсированного Ge с [3], по-видимому, связано с различием уровней легирования исследованных образцов. Увеличение концентрации примесей на порядок при той же сте-

пени компенсации вызывает увеличение разброса энергий донорных уровней $\delta\varepsilon_D$ из-за межпримесного взаимодействия, имеющего кулоновскую природу, так как в компенсированном полупроводнике большая часть примесей находится в заряженном состоянии. Согласно [4], ширина $\delta\varepsilon_D = \left(\frac{4\pi}{3} N_D\right)^{1/2} \kappa^{-1} e^2 \approx \approx 4$ мэВ для $N_D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Многозарядность примесей приводит к увеличению $\delta\varepsilon_D$. Очевидно, что в первую очередь заполняются более глубокие состояния и в результате происходит сдвиг спектра фотопроводимости компенсированного Ge в сторону больших энергий фотонов, величина которого соответствует приведенной выше оценке $\delta\varepsilon_D$. В работе [5] предсказывается возможность сдвига красной границы фотопроводимости в сильно компенсированном полупроводнике, у которого в условиях термодинамического равновесия часть доноров



Спектры фотопроводимости компенсированного Ge n-типа при $T=4.2$ (1) и 15.6 К (2); $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; некомпенсированного Ge (3) с $N_D = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T=4.2$ К.

нейтральна, а в Ge : Cu : Sb, исследованном нами, в равновесном состоянии все атомы Sb ионизованы и их заполнение осуществляется путем ионизации ионов Cu с последующим захватом электронов на мелкую примесь при низких температурах, поэтому количественное сравнение с [5] вряд ли возможно.

Исчезновение фотопроводимости в области $h\nu \leq 15$ мэВ при 15.6 К может быть связано с опустошением более мелких состояний из-за увеличения в больших полях ($E=100$ В/см) сечения захвата на отталкивающую примесь (на это указывает сублинейный характер ВАХ при 15.6 К).

Таким образом, полученные нами спектры фотопроводимости Ge : Cu : Sb коренным образом отличаются от приведенных в литературе спектров фотопроводимости некомпенсированного германия с таким же уровнем легирования. Это, очевидно, демонстрирует влияние кулоновского потенциала хаотически распределенных заряженных примесных центров на энергетический спектр мелкой примеси в полупроводнике.

Авторы признательны М. С. Кагану, Н. Г. Ждановой, В. Н. Губанкову и А. Я. Шульману за обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Болибок А. М., Каган М. С., Ландсберг Е. Г. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 267—273.
- [2] Keigo Nagasaka, Shin-Ichiro Narita // J. Phys. Soc. Japan. 1973. V. 35. N 3. P. 788—796.
- [3] Морозова В. А., Курова И. А., Кулаковский В. Д. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 9. С. 1683—1686.

- [4] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.

[5] Нгуен Ван Лиен, Шкловский Б. И. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 9. С. 1763—1770.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР
Москва

Получено 19.12.1988
Принято к печати 20.12.1988
