

УДК 621.315.592

ФЛУКТУАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ В ПРИМЕСНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ

Т. М. Бурбаев, В. А. Курбатов

Рассмотрено влияние оптического возбуждения примесных центров на флуктуационный рельеф потенциала в примесном полупроводнике при низких температурах. Полученные оценочные выражения использованы для анализа экспериментальных результатов. Найдено хорошее согласие вычисленной зависимости квантовой эффективности фотопроводимости в $Ge : Zn^{II}$ от интенсивности излучения с измеренными значениями.

Кажется очевидным, что возрастание концентрации свободных носителей при оптическом возбуждении примесей в полупроводнике должно привести к уменьшению длины экранирования и, как следствие, к уменьшению флуктуаций потенциала. Однако, при низких температурах экранирование осуществляется зарядами, связанными на примесных центрах, концентрация которых порядка полной концентрации примесей [1]. Поэтому даже при весьма высоких интенсивностях излучения, обеспечивающих неравновесную концентрацию свободных носителей, много большую тепловой, роль свободных электронов не будет значительной, пока их концентрация остается много меньшей концентрации примесей. Более важным в этом случае будет влияние оптического возбуждения примесных центров на объемное распределение связанных зарядов, что до настоящего времени не обсуждалось.

Равновесное распределение связанных зарядов устанавливается в результате теплового обмена со свободной зоной, темп которого зависит от энергии тепловой ионизации примесных центров, поэтому связанные на центрах носители занимают преимущественно состояния, расположенные в областях пониженного потенциала. Темп оптической генерации, в отличие от теплового, практически не зависит от энергетического положения

примесного центра в потенциальном рельефе, а лишь от заселенности примесных центров, поэтому оптическое возбуждение примесей должно приводить к перемешиванию носителей по состояниям с различной энергией. Корреляция во взаимном расположении связанных зарядов, т.е. экранирование случайного поля, при этом должно ослабляться. Физически это означает увеличение полной энергии системы, вызванное внешним источником (оптическое возбуждение). Если считать, что достаточно глубокие состояния, для которых темп оптической генерации превышает темп тепловой генерации, заполняются равновероятно, то можно предположить, что оптическое возбуждение примесных состояний приведет к возрастанию флуктуационного рельефа до величины, при которой темп оптической генерации с наиболее мелких состояний будет меньше теплового. Эти соображения позволяют выполнить количественную оценку флуктуаций потенциала в условиях оптической генерации.

Приравняв темпы оптической и тепловой генерации, найдем энергию тепловой ионизации, соответствующую данному значению интенсивности излучения:

$$E_T = kT \ln \frac{\alpha N_v h\nu}{gI\sigma}. \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент захвата носителей ионами примесей, N_v – плотность состояний в свободной зоне, g – фактор вырождения примесного уровня, I – интенсивность излучения, σ – сечение поглощения кванта $h\nu$ неионизованным примесным центром.

Разность $(E_0 - E_T)$, где E_0 – энергия ионизации изолированного примесного центра, приближенно определяет характерную амплитуду потенциального рельефа γ . Такая оценка имеет смысл при $G_0 > G_T(E_1)$, где G_0 – темп оптической генерации, а $G_T(E_1)$ – темп тепловой генерации при энергии ионизации E_1 , соответствующей равновесному случаю. $(E_0 - E_1) \approx \gamma_0$, где γ_0 – амплитуда флуктуаций потенциала при $I = 0$. Для $I \neq 0$ и $E_T < E_1$

$$\gamma \approx E_0 - E_T. \quad (2)$$

Эта формула не учитывает экранирования свободными носителями.

Используем полученные выражения для анализа результатов проведенных нами исследований оптического поглощения примесными центрами Zn^- в германии и измерений пороговой чувствительности фоторезисторов из $Ge : Zn^{II}$ в режиме мощного импульсного излучения гетеродина. Часть этих результатов опубликована в работах [2, 3]. Результаты оптических и электрофизических измерений на серии образцов, концентрация примесей в которых изменяется в широком диапазоне, позволяют найти связь

между сечением фотоионизации примеси и величиной флуктуационного потенциала. Эта связь объясняется влиянием флуктуационного потенциала на закон дисперсии [3, 4]. В области проведенных измерений полученные результаты можно описать эмпирической зависимостью $\sigma \approx \gamma^{-1}$ (рис. 1).

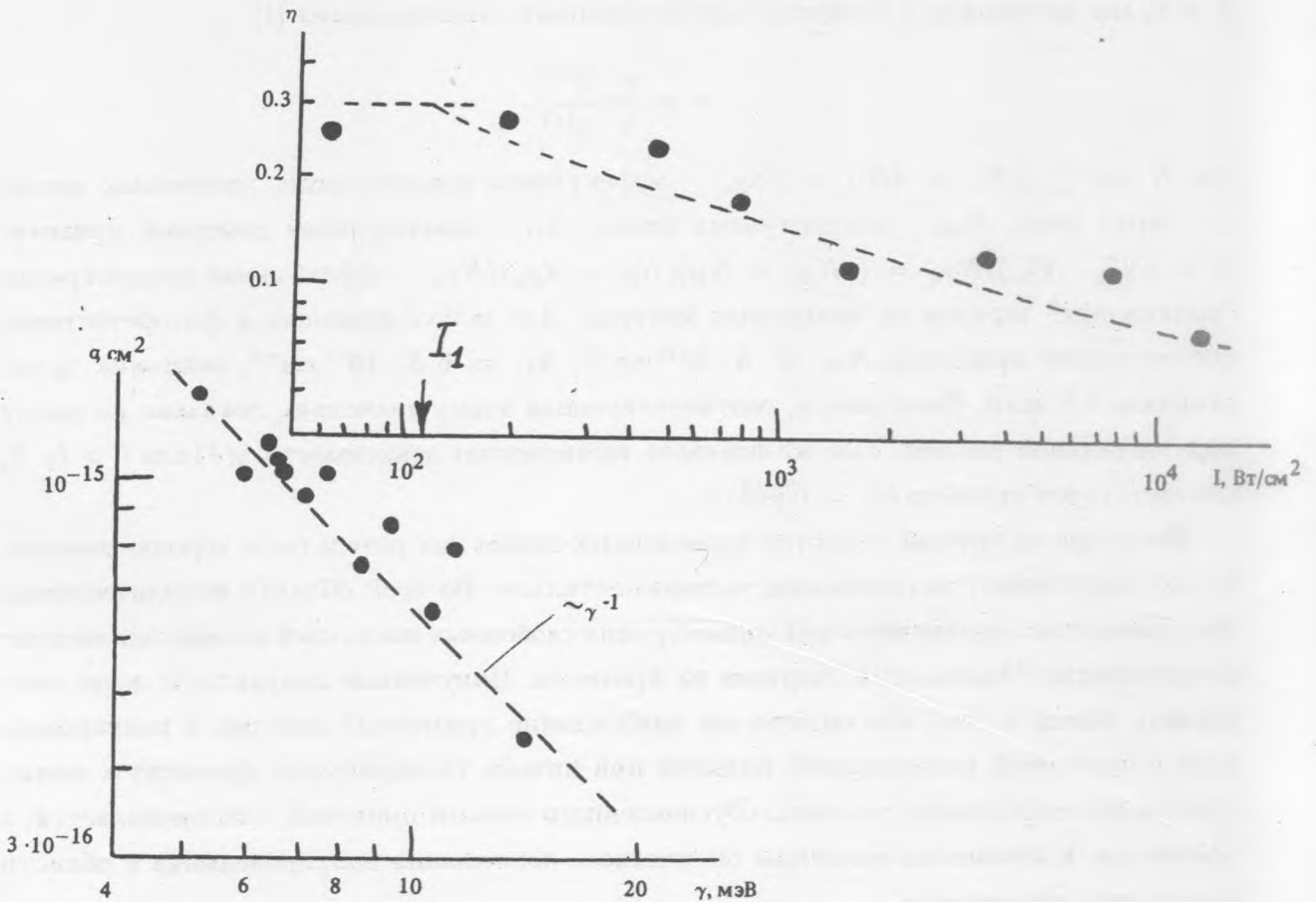


Рис. 1. Зависимость сечения фотоионизации σ ионов Zn^{II} в германии от амплитуды потенциального рельефа γ .

Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности η фоторезистора из $Ge : Zn^{II}$ от интенсивности излучения I .

Измерения пороговой чувствительности гетеродинного фотодетектора при высоких мощностях гетеродина обнаружили зависимость квантового выхода η фоторезисторов из $Ge : Zn^{II}$ от интенсивности излучения, падающего на фоторезистор (рис. 2). Зная характеристики материала фоторезистора и его геометрические размеры, нетрудно рассчитать зависимость η от I , пользуясь выражениями (1), (2) и зависимостью $\sigma(\gamma)$, приведенной на рис. 1. Величину флуктуационного потенциала в равновесных условиях, $I = 0$, мы вычисляли в приближении нелинейного экранирования [1]:

$$\gamma = \frac{e^2 N^{2/3}}{\epsilon n^{1/3}},$$

где $N = \sum z_i^2 N_i = 4N_D - 2N_{Zn}$ - эффективная концентрация примесных ионов, z - заряд иона, N_{Zn} - концентрация цинка, N_D - концентрация донорной примеси, $n = (N_{Zn}^- \cdot N_{Zn}^+)/N_{Zn} = (2N_{Zn} - N_D)(N_D - N_{Zn})/N_{Zn}$ - эффективная концентрация "подвижных" зарядов на примесных центрах. Для использованных в фоторезисторах концентраций примесей, $N_{Zn} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 6,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, величина γ_0 составляла 5,6 мэВ. Величина η , соответствующая этому значению, показана на рис. 2 горизонтальной линией. Там же показана вычисленная зависимость $\eta(I)$ для $I > I_1$. I_1 соответствует условию $G_0 = G_T(E_1)$.

Несмотря на грубый характер проведенных оценок, их результаты хорошо совпадают со значениями, полученными экспериментально. Во всей области использованных при измерениях интенсивностей концентрация свободных носителей оставалась меньше концентрации "подвижных" зарядов на примесях. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оптическое возбуждение примесных центров в полупроводнике с частичной компенсацией примеси при низких температурах приводит к возрастанию потенциального рельефа, обусловленного ионами примесей, что проявляется, в частности, в изменении величины оптического поглощения полупроводника в области примесного поглощения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л., Электронные свойства легированных полупроводников, М., Наука, 1979.
- [2] Асланов Г. А. и др., Препринт ФИАН N 270, М., 1987.
- [3] Галкин М. Г., Курбатов В. А., Соловьев Н. Н., ФТП, **22**, 1122 (1988).
- [4] Галкин М. Г., Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9, 32 (1989).

Поступила в редакцию 15 марта 1994 г.